



Tiago Filipe Ramião Ramos da Palma

ICARUS - Busca e Salvamento Utilizando Detecção Sonar

**Utilização de um sistema sonar em UUV para detecção de
náufragos**

Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Ciências
Militares Navais, na especialidade de Engenheiros Navais – Ramo
de Armas e Eletrónica



Alfeite
2015



ESCOLA NAVAL



la sãntõr bñfairr

Tiago Filipe Ramião Ramos da Palma

ICARUS - Busca e Salvamento Utilizando Detecção Sonar
Utilização de um sistema sonar em UUV para deteção de naufragos

**Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Ciências Militares Navais, na
especialidade de Engenheiros Navais - Ramo de Armas e Eletrónica**

Orientação de: Professor Doutor Victor José de Almeida e Sousa Lobo

Coorientação de: CTEN Claro Lourenço

O Aluno Mestrando

O Orientador

O Coorientador

[Tiago Ramos da Palma]

[Victor Sousa Lobo]

[Claro Lourenço]

Alfeite
2015

Scientific work must not be considered from the point of view of the direct usefulness of it. It must be done for itself, for the beauty of science, and then there is always the chance that a scientific discovery may become like the radium, a benefit.

Marie Curie

Agradecimentos

Apesar do desenvolvimento de uma dissertação de mestrado ser um trabalho solitário, sem os contributos de algumas pessoas não teria sido possível.

Em particular, gostaria de agradecer ao meu tutor Prof. Doutor Victor Sousa Lobo que apesar do seu tempo limitado, sempre que nos encontrávamos, resolvia todos os problemas que para mim pareciam impossíveis de resolver e me renovava as esperanças de conseguir concluir com sucesso este projeto.

Ao meu coorientador, Capitão-Tenente Claro Lourenço, por toda a disponibilidade e entusiasmo demonstrados.

Ao Capitão-de-Fragata EN-AEL Ribeiro Correia, não só pela preocupação ao longo destes anos de Escola Naval, mas também pelo acompanhamento, ajuda e disponibilidade na realização desta dissertação.

Especial agradecimento aos meus pais, a quem dedico este trabalho, pela disponibilidade, apoio incondicional e paciência que sempre demonstraram ao longo da minha vida.

E por último, mas não menos importante à minha namorada e amigos. Sem vocês não teria chegado a bom porto!

Resumo

Esta dissertação visa verificar a viabilidade de recorrer a um sistema sonar *upward looking* na deteção de naufragos, bem como a sua aplicação num UUV.

Uma vez que quando à deriva a maior parte do corpo humano se encontra submerso, torna-se lógico pensar que o método mais eficaz de deteção será aquele que se propague no meio aquático.

Um sistema deste tipo possibilita a obtenção de assinaturas quando é impraticável usar sistemas óticos, com maior eficiência e qualidade do que um que utilize ondas eletromagnéticas (por exemplo, radar).

Esta tese contribui para o trabalho que o Centro de Investigação Naval (CINAV) está a desenvolver para o projeto ICARUS (unmanned search and rescue), procurando desenvolver a base de conhecimento para o desenvolvimento de um sistema autónomo para busca, deteção e salvamento de naufragos.

Palavras-chave: sonar, UUV, AUV, deteção de naufragos, assinaturas sonar.

Abstract

This work aims to verify the feasibility of using a system upward looking sonar in castaway detection, as well as its application in a UUV .

Being that when adrift most of the human body is submerged, it becomes logical to think that the most effective method of detection is one that spreads underwater.

Such a system makes it possible to obtain signatures when it is impracticable to use optical systems, with greater efficiency and quality than one that uses electromagnetic waves (e.g. radar).

This thesis contributes to the work that the Naval Research Centre (CINAV) is developing for the ICARUS project (unmanned search and rescue) , seeking to develop the knowledge base for the development of an autonomous system for search , detection and rescue of shipwrecked people.

Keywords: sonar, UUV, AUV, castaway detection, sonar signature.

Índice

AGRADECIMENTOS.....	V
RESUMO.....	VII
ABSTRACT	IX
ÍNDICE	XI
ÍNDICE DE FIGURAS	XIII
ÍNDICE DE TABELAS	XV
ABREVIATURAS	XVII
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. MOTIVAÇÃO E CONTEXTUALIZAÇÃO DO TRABALHO	1
1.2. PROJETO ICARUS – ENQUADRAMENTO	1
1.3. DESCRIÇÃO DO PROJETO	2
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	5
2.1. CARACTERÍSTICAS OCEANOGRÁFICAS	5
2.2. O SOM E A SUA PROPAGAÇÃO NO MAR	14
2.3. EQUAÇÃO DA ONDA	17
2.4. RELAÇÕES ACÚSTICAS BÁSICAS.....	18
3. SISTEMAS SONAR.....	23
3.1. BREVE ENQUADRAMENTO HISTÓRICO	23
3.2. CARACTERIZAÇÃO DO SONAR.....	24
3.3. ESTUDO DE MERCADO	27
4. UNMANNED UNDERWATER VEHICLES	29
4.1. PROPULSÃO BIOMIMÉTICA.....	30
4.2. DEFINIÇÃO DE TAREFAS.....	32
5. METODOLOGIA E APLICAÇÕES	33
5.1. CONDIÇÕES E OBJETIVOS DOS TESTES	33
5.2. ESQUEMÁTICO UTILIZADO.....	34
5.3. TESTES E RESULTADOS	35
CONCLUSÕES.....	49

TRABALHOS FUTUROS.....	51
BIBLIOGRAFIA.....	53
APÊNDICE I – SONARES ESCOLHIDOS E CARACTERÍSTICAS PRINCIPAIS	59
APÊNDICE II – TESTE NO TANQUE DA ES C/ ROV E SONAR SINGLE-BEAM	61
APÊNDICE III – TESTE NA PISCINA DA BNL E PRIVADA – SONAR SIDESCAN	63

Índice de figuras

FIGURA 2.1 – REGISTO DE BATITERMÓGRAFO XBT REALIZADO A BORDO DO NRP BARTOLOMEU DIAS.....	6
FIGURA 2.2 - MÉDIA ANUAL DA DISTRIBUIÇÃO DE SALINIDADE DA SUPERFÍCIE DO MAR (WORLD OCEAN ATLAS, 2005)	7
FIGURA 2.3 - MÉDIA ANUAL DA TEMPERATURA DA SUPERFÍCIE DO MAR (WORLD OCEAN ATLAS, 2005)	7
FIGURA 2.4 – RELAÇÃO ENTRE A VELOCIDADE DO SOM E A PROFUNDIDADE NUMA POSIÇÃO A NORTE DO HAWAI, NO OCEANO PACÍFICO (WORLD OCEAN ATLAS, 2005).....	9
FIGURA 2.5 – DIVERGÊNCIA ESFÉRICA	11
FIGURA 2.6 – CORTE SIMULADO DO MEIO DE PROPAGAÇÃO DO SOM.....	11
FIGURA 2.7 – $TL = 20 \log R$	12
FIGURA 2.8 – $TL > 20 \log R$	12
FIGURA 2.9 – $TL < 20 \log R$	12
FIGURA 2.10 – DIVERGÊNCIA DE ONDAS ESFÉRICAS PROVENIENTES DE UMA FONTE PONTUAL EM UM MEIO HOMOGÊNEO E SEM FRONTEIRAS.....	12
FIGURA 2.11 – DIVERGÊNCIA CILÍNDRICA.....	13
FIGURA 2.12 – DIVISÃO DO MEIO ONDE O SOM SE PROPAGA.	14
FIGURA 2.13 - APARÊNCIA (EXAGERADA) DAS FATIAS DO MEIO MATERIAL, ONDE OCORRE A PROPAGAÇÃO DAS ONDAS LONGITUDINAIS	16
FIGURA 2.14 - APARÊNCIA (EXAGERADA) DAS FATIAS DO MEIO MATERIAL, ONDE OCORRE A PROPAGAÇÃO DAS ONDAS TRANSVERSAIS	16
FIGURA 2.15 – ESPECTRO DO NÍVEL DE RUÍDO AMBIENTE (ERA) EM ÁGUAS PROFUNDAS (WENZ, 1962).....	19
FIGURA 3.1 - PRINCÍPIOS DE OPERAÇÃO DO SONAR ATIVO	24
FIGURA 3.2 - DESEMPENHO LIMITADO POR RUÍDO.....	26
FIGURA 3.3 - DESEMPENHO LIMITADO POR REVERBERAÇÃO.....	26
FIGURA 4.1 – ALGUNS EXEMPLOS DOS UUV ATUAIS	29
FIGURA 4.2 – ALGUNS EXEMPLOS DE VEÍCULOS COM PROPULSÃO BIOMIMÉTICA	31
FIGURA 5.1 – ESQUEMÁTICO DA CONFIGURAÇÃO PRIMÁRIA A EXECUTAR	34
FIGURA 5.2 – ESQUEMÁTICO DA CONFIGURAÇÃO SECUNDÁRIA A EFETUAR	34
FIGURA 5.3 – ESQUEMÁTICO DA RECOLHA DE DADOS A SER EFETUADA EM SITUAÇÃO DE APLICAÇÃO REAL	35
FIGURA 5.4 – FLUXOGRAMA RECOLHA DE ASSINATURAS DE CORPO HUMANO.....	37
FIGURA 5.5 – FLUXOGRAMA RECOLHA DE ASSINATURAS DE OBJETOS.	37
FIGURA 5.6 – TÁBUA DE MADEIRA UTILIZADA PARA A BASE DE DADOS	39
FIGURA 5.7 – BALDES DE ALUMÍNIO UTILIZADOS PARA A BASE DE DADOS.....	39
FIGURA 5.8 – CHAPÉU-DE-CHUVA UTILIZADO PARA A BASE DE DADOS	39
FIGURA 5.9 – POSIÇÃO PENSADA PARA A POSIÇÃO DE BARRIGA PARA BAIXO	40
FIGURA 5.10 – ASSINATURAS SONAR DE UM CORPO DE BARRIGA PARA BAIXO NA SUPERFÍCIE (800 KHz/20 dB)	40
FIGURA 5.11 – ASSINATURAS SONAR DE UM CORPO DE BARRIGA PARA BAIXO (CRAWL) NA SUPERFÍCIE (800 KHz/30 dB) ...	41
FIGURA 5.12 – ASSINATURAS SONAR DE UM CORPO DE BARRIGA PARA BAIXO (CRAWL) NA SUPERFÍCIE (330 KHz/20 dB) ...	41

FIGURA 5.13 – ASSINATURAS SONAR DE UM CORPO DE BARRIGA PARA BAIXO (CRAWL) NA SUPERFÍCIE (330 KHz/30 dB)...	42
FIGURA 5.14 - POSIÇÃO PENSADA PARA A POSIÇÃO DE COSTAS	42
FIGURA 5.15 – ASSINATURA SONAR DE UM CORPO DE COSTAS NA SUPERFÍCIE (800 KHz/20 dB)	43
FIGURA 5.16 – ASSINATURA SONAR DE UM CORPO DE COSTAS NA SUPERFÍCIE (800 KHz/30 dB)	43
FIGURA 5.17 – ASSINATURA SONAR DE UM CORPO DE COSTAS NA SUPERFÍCIE (330 KHz/20 dB)	44
FIGURA 5.18 – ASSINATURA SONAR DE UM CORPO DE COSTAS NA SUPERFÍCIE (330 KHz/30 dB)	44
FIGURA 5.19 – POSIÇÃO PENSADA PARA A POSIÇÃO DE LADO	44
FIGURA 5.20 – ASSINATURA SONAR DE UM CORPO DE LADO NA SUPERFÍCIE (800 KHz/20 dB)	45
FIGURA 5.21 – ASSINATURA SONAR DE UM CORPO DE LADO NA SUPERFÍCIE (800 KHz/30 dB)	45
FIGURA 5.22 – ASSINATURA SONAR DE UM CORPO DE LADO NA SUPERFÍCIE (330 KHz/20 dB)	46
FIGURA 5.23 – ASSINATURA SONAR DE UM CORPO DE LADO NA SUPERFÍCIE (330 KHz/30 dB)	46
FIGURA 5.24 – POSIÇÃO PENSADA PARA A POSIÇÃO DE PÉ	46
FIGURA 5.25 – ASSINATURA SONAR DE UMA TÁBUA DE MADEIRA NA SUPERFÍCIE (800 KHz/20 dB)	47
FIGURA 5.26 – ASSINATURA SONAR DE UMA TÁBUA DE MADEIRA NA SUPERFÍCIE (800 KHz/30 dB)	47
FIGURA 5.27 – ASSINATURA SONAR DE UMA TÁBUA DE MADEIRA NA SUPERFÍCIE (330 KHz/20 dB)	47
FIGURA 5.28 – ASSINATURA SONAR DE 3 BALDES DE ALUMÍNIO NA SUPERFÍCIE (800 KHz/20 dB)	47
FIGURA 5.29 – ASSINATURA SONAR DE 3 BALDES DE ALUMÍNIO NA SUPERFÍCIE (800 KHz / 30 dB)	47
FIGURA 5.30 – ASSINATURA SONAR DE 3 BALDES DE ALUMÍNIO NA SUPERFÍCIE (330 KHz/20 dB)	47
FIGURA 5.31 – ASSINATURA SONAR DE UM CHAPÉU-DE-CHUVA NA SUPERFÍCIE (800 KHz/20 dB)	48
FIGURA 5.32 – ASSINATURA SONAR DE UM CHAPÉU-DE-CHUVA NA SUPERFÍCIE (800 KHz/30 dB)	48
FIGURA 5.33 – ASSINATURA SONAR DE UM CHAPÉU-DE-CHUVA NA SUPERFÍCIE (330 KHz/20 dB)	48

Índice de tabelas

TABELA 1 – AVALIAÇÃO DOS SONARES ESCOLHIDOS.....	27
--------------------------------------------------	----

Abreviaturas

AUV – *Autonomous Unmanned Vehicle*

CINAV – Centro de Investigação Naval

dB – Decibel

DMS3 – Destacamento de Mergulhadores Sapadores nº3

ES – Esquadilha de Submarinos

Hz – Hertz

OTAN/NATO – Organização do Tratado do Atlântico Norte/ *North Atlantic Treaty Organization*

PSU - *Practical Salinity Units* (Unidades Práticas de Salinidade)

UUV – *Unmanned Underwater Vehicle*

1. Introdução

1.1. Motivação e contextualização do trabalho

Na Marinha Portuguesa os veículos autónomos têm vindo a ganhar cada vez mais importância. Presentemente, tendo em vista as aplicações futuras, assiste-se a um esforço de investigação que visa a operação conjunta de múltiplos veículos autónomos, atuando em cooperação ou isoladamente.

A ideia para este projeto surgiu a partir da análise de uma lacuna existente em todas as organizações que operam no mar e em situações que coloquem em causa a vida humana. Em cenários de Busca e Salvamento (*Search and Rescue – SAR*), existindo a necessidade de encontrar um corpo no mar, percebe-se imediatamente a dificuldade que existe utilizando-se os meios existentes atualmente. Tendo em conta que um corpo humano à deriva se encontra maioritariamente submerso, mesmo quando com colete salva-vidas envergado, visualmente é muito difícil de ser avistado. O *modus operandi* nestas situações envolve meios de superfície e aéreos, verificando-se no entanto uma baixa taxa de sucesso durante o dia e quase nula com pouco ou nenhuma luminosidade.

1.2. Projeto ICARUS – Enquadramento

Enquadrado no Projeto *ICARUS* e no âmbito do CINAV, este trabalho tem como objetivo desenvolver robótica e ferramentas com capacidade para ajudar as equipas de intervenção em panoramas de crise.

A introdução de veículos autónomos visa acelerar o processo de SAR, tornando-se uma ferramenta valiosa para salvar vidas humanas. O projeto ICARUS concentra-se no desenvolvimento de tecnologias de SAR não tripulados para detetar, localizar e resgatar seres humanos.

Apesar de existirem variadíssimos estudos e projetos desenvolvidos, o contraste com a realidade praticada é imenso, não tendo os usuários finais acesso a este tipo de tecnologia.

O projeto ICARUS aborda estas questões, com o objetivo de preencher a lacuna entre a comunidade científica e os utilizadores finais, desenvolvendo uma caixa de ferramentas de componentes integrados para Busca e Salvamento não tripulado.

1.3. Descrição do Projeto

Com esta dissertação pretende-se estudar a viabilidade e características da utilização de um veículo autónomo submarino (*Unmanned Underwater Vehicle* - UUV), equipado com um sonar direcionado para a superfície (*upward looking*)

Os objetivos traçados para esta dissertação, exigirão a realização de vários testes com um sistema sonar. A diversidade dos resultados será conseguida por intermédio de testes em diferentes tipos de ambientes simulados. Genericamente falando, os registos sonar recolhidos, no decorrer das experiências, serão guardados e, posteriormente, tratados e analisados no âmbito da dissertação de mestrado do ASPOF EN-AEL Maia da Fonseca. Desta forma será possível determinar a viabilidade da utilização de um sistema sonar instalado num UUV em missões SAR. Esta metodologia é utilizada por ser uma forma de tratar um problema bastante complexo de engenharia, de forma mais simples e com base empírica, reduz também em muito os testes que serão necessários executar.

A utilização do sonar em modo *upward looking* é fracamente explorada, por ser algo bastante complexo de se executar e com vários problemas associados. São então, normalmente utilizados nos projetos recentes equipamentos de vídeo/fotografia, infravermelhos e/ou câmaras termográficas, não sendo posto em consideração a utilização de sonares.

Desta forma, antes de tratar os parâmetros, segundo os quais, o sonar captará com sucesso o corpo humano à superfície, vou abordar a teoria do meio em que se trabalha. Após isto, farei um estudo do sistema sonar, visto este ser o meio de ligação com o meio de aquisição de informações, incidindo no sonar ativo, uma vez que os dados serão recolhidos por este equipamento. Seguidamente abordarei os meios UUV existentes bem como as exigências necessárias, que deverão existir, na escolha do equipamento autónomo que irá fazer parte deste projeto. No final, apresentarei as experiências realizadas, bem como as suas conclusões, de acordo com a utilização do sonar ativo e

do veículo testado para a monitorização de náufragos. O último capítulo será de conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

2. Revisão Bibliográfica

2.1. Características oceanográficas

A oceanografia estuda os processos e parâmetros físicos do mar, assim como as espécies marinhas e os seus comportamentos, recorrendo ao uso do som no oceano. (Thorpe, 1996)

2.1.1. Propriedades físicas e químicas

Em acústica submarina a temperatura, a salinidade e a pressão são as propriedades com mais influência.

Qualquer aumento que se verifique numa destas propriedades irá corresponder a um aumento da velocidade do som.

Dos três fatores que influenciam a velocidade do som, a temperatura é o que provoca a maior variação. A alteração de 1°C irá corresponder uma variação na velocidade do som de cerca de 3 m/s. (Urick, 1983)

A medição desse parâmetro é feita utilizando-se o batitermógrafo, conhecido como BT (*BathyThermograph*), ou a sua versão descartável, o XBT (*Expendable BathyThermograph*), os quais medem a temperatura da água em diferentes profundidades.

As maiores variações de temperatura ocorrem nas camadas superficiais, devido ao efeito da insolação e às misturas causadas pela ação dos ventos e correntes. A importância da variação da temperatura faz-se sentir até cerca dos 1000 metros.

As características que dependem da salinidade no estudo da dinâmica dos oceanos são: a compressibilidade e, consequentemente, a velocidade de propagação do som; o índice de refração; o ponto de congelação e a temperatura de máxima densidade. É descrita por uma escala, conseguida a partir da comparação da grandeza com uma amostra padrão e é conhecida como Escala Prática de Salinidade ou *Practical Salinity Unit* (PSU).

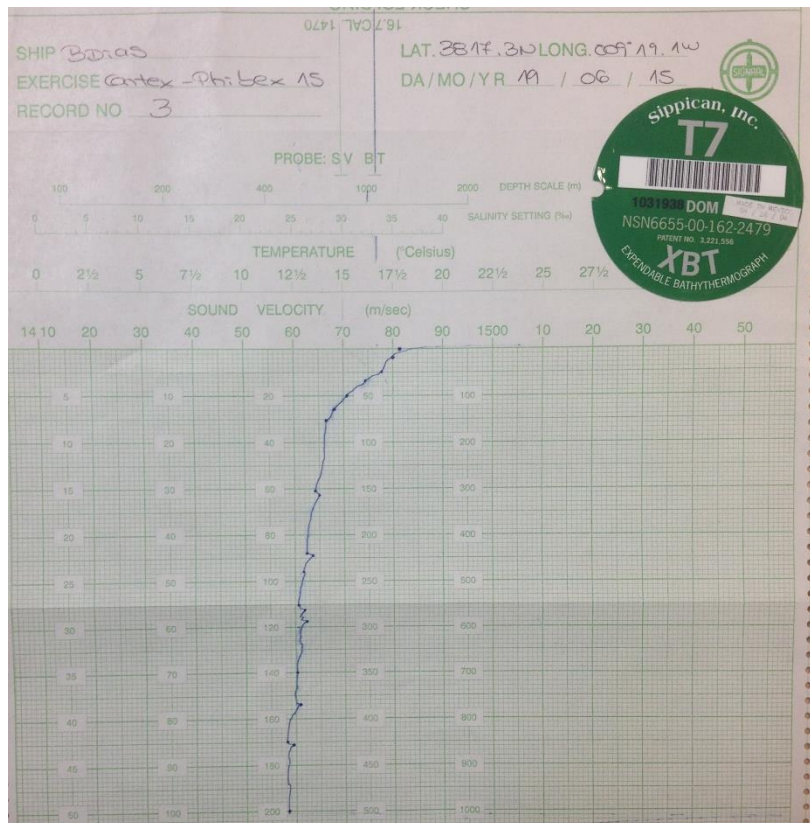


Figura 2.1 – Registro de batitermógrafo XBT realizado a bordo do NRP Bartolomeu Dias

A salinidade é o termo usado para expressar a quantidade de sais dissolvidos na água. Nos oceanos, esses valores variam entre 33 e 37 PSU (Falin Chen, 2013), sendo em média 35 PSU, ou seja, 1kg de água contém 35g de sal.

A densidade da água do mar (ρ) é importante no estudo da dinâmica dos oceanos, uma vez que variações horizontais reduzidas podem provocar correntes bastante fortes. A estabilidade hidrostática dos oceanos deve-se portanto a esta propriedade (Etter, 2013).

A compressibilidade está também relacionada com a densidade, esta propriedade expressa as mudanças no volume de acordo com as variações de pressão. Consegue-se determinar com precisão a densidade, bem como a velocidade de propagação do som, recorrendo ao valor da compressibilidade. Para tal, utiliza-se a seguinte equação (Etter, 2002):

$$c = \sqrt{\frac{\tau}{\mu\rho}}, \quad (2.1)$$

onde c é a velocidade do som, μ é o coeficiente de compressibilidade, τ o calor específico da água e ρ a densidade.

Um aumento de 1 Kg/m^2 provoca um aumento de $1,2 \text{ m/s}$.

A distribuição da salinidade à superfície é determinada pelos efeitos opostos da evaporação e precipitação, sendo que ocorre um maior valor de salinidade nas regiões onde a evaporação anual excede o valor da precipitação. Os valores mais baixos de salinidade à superfície registam-se nas regiões polares dos glaciares durante o verão devido ao degelo enquanto que os valores mais altos ocorrem nas regiões de grande evaporação, como são os casos da zona leste do Mediterrâneo (39 PSU) e do Mar Vermelho (41 PSU).

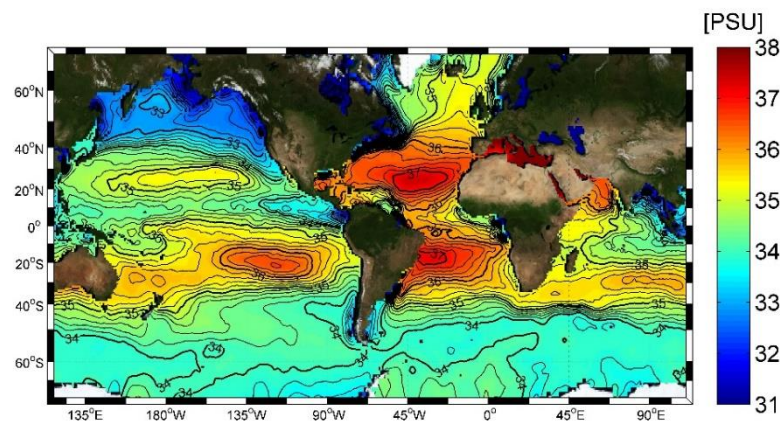


Figura 2.2 - Média anual da distribuição de salinidade da superfície do mar (World Ocean Atlas, 2005)

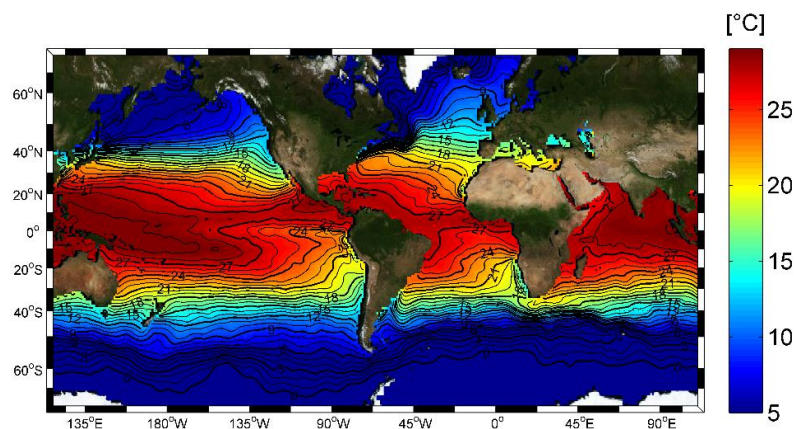


Figura 2.3 - Média anual da temperatura da superfície do mar (World Ocean Atlas, 2005)

Relativamente à distribuição vertical da salinidade, a partir de profundidades da ordem dos 4000 metros a variação é praticamente nula.

Em relação à pressão, última propriedade referida com impacto na velocidade de propagação do som na água, afirma-se que esta não tem grande influência na velocidade

de propagação a menores profundidades no entanto, não pode ser descurada a grandes profundidades (>1000 m). É muito relevante em situações onde a temperatura e a salinidade são constantes. Um aumento de 1 metro de profundidade provoca um aumento em média de 0,017 m/s na velocidade de propagação (Urlick, 1983).

2.1.2. Velocidade do Som

A velocidade do som é a principal grandeza considerada na propagação sonora em meio aquático e as suas variações devem-se às propriedades físicas e químicas anteriormente descritas. Logo, em diferentes locais do oceano, a diferentes períodos de tempo, a velocidade do som será diferente.

O cálculo da velocidade do som é feito a partir da seguinte equação (Mackenzie, 1981):

$$c = 1448.96 + 4.591T - 5.304 * 10^{-2}T^2 + 2.374 * 10^{-4}T^3 + 1.304(S - 35) + 1.630 * 10^{-2}D + 1.675 * 10^{-7}D^2 - 1.025 * 10^{-2}T(S - 35) - 7.139 * 10^{-13}TD^3, \quad (2.2)$$

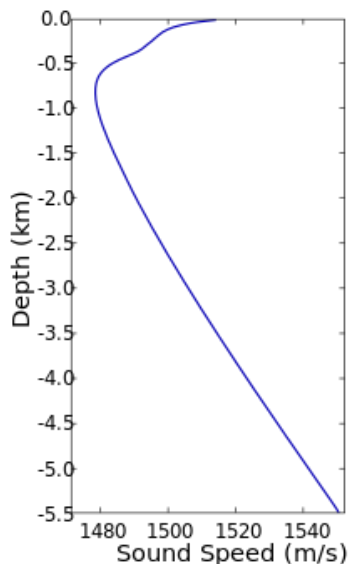
onde c é a velocidade do som (m/s), T a temperatura (°C), S a salinidade (PSU) e D a profundidade (m).

Analisando a expressão, verifica-se que a temperatura é o fator determinante. Uma vez que a operação dos equipamentos sonares normalmente se faz em águas rasas, o efeito da variação de pressão não tem relevância. Quanto à salinidade, devido às variações em mar aberto serem reduzidas, a sua influência também é pequena, no entanto, nas áreas de vizinhança da foz de um rio a salinidade torna-se um fator a ter em conta.

A distribuição dos perfis de velocidade varia de zona para zona e de acordo com as diferentes estações. O perfil de velocidade do som (Figura 2.3) depende muito do perfil de temperatura, o qual se divide em três camadas, cada qual com características diferentes.

Sob a superfície encontra-se uma região de temperatura constante, camada de mistura, em que a velocidade é influenciada pelas variações do aquecimento na superfície do mar e pela ação do vento. A base denomina-se por profundidade da

camada de mistura. Como o perfil de temperatura é em média constante, a velocidade é aumentada com a profundidade. Isto deve-se ao facto de existir um aumento da pressão. A segunda camada é denominada de termoclina principal, local onde a temperatura diminui consoante o aumento da profundidade, provocando um forte gradiente negativo. Por fim, de baixo da termoclina e até o fundo, encontra-se a camada



profunda, que se caracteriza pela temperatura constante e um aumento da velocidade do som em consonância com o aumento da pressão. O perfil de velocidade nesta camada é praticamente linear, apresentando um gradiente positivo.

Figura 2.4 – Relação entre a velocidade do som e a profundidade numa posição a norte do Hawaii, no Oceano Pacífico (World Ocean Atlas, 2005)

2.1.3. Reflexões sonoras na superfície e no fundo do mar

O som sofre bastantes alterações durante a sua propagação. A superfície e o fundo do mar são zonas muito refletoras e com elevada rugosidade, o que provoca a dispersão do som.

Enquanto na superfície do mar, as alterações que a propagação sonora sofre são devidas à reverberação, à ação do vento e correntes, que por sua vez, provocam ruído e bolhas. Junto ao fundo do mar, o que provoca a alteração da trajetória do som é a irregularidade de todo o material que o constitui.

Visto a topografia do fundo ser bastante variável e acidentada, provoca um nível de perdas e reflexões superiores, o que é ainda mais acentuado quando se trata de transmissões acústicas de alta frequência.

Portanto, percebe-se assim que as dificuldades associadas às transmissões sonoras à superfície. Não só devido à rugosidade desta zona mas também pelas bolhas e ruído

existentes. Uma vez que as bolhas absorvem parte do som incidente e refletem em diferentes direções a outra, o ângulo a que estará instalado o sonar é importante. Com um ângulo de instalação correto do sonar no UUV, é possível minimizar este efeito (Urlick, 1983).

2.1.4. Perdas por divergência

Durante a propagação, parte da energia acústica é continuamente absorvida pelo meio, pela transformação da mesma em calor. Outra parte é dispersa por diferentes tipos de heterogeneidades, como bolhas de ar e a massa biológica. Em termos práticos, como não se distingue uma da outra, combina-se ambos os efeitos num só termo. A atenuação é diretamente proporcional à frequência de emissão da fonte e existe uma série de fórmulas empíricas para o seu cálculo (LURTON 2002).

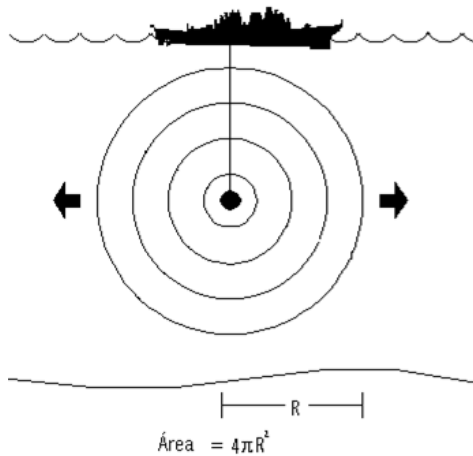
As perdas por divergência são o resultado do enfraquecimento frequente do sinal sonoro, à medida que este se vai afastando da fonte. No entanto, não há uma perda real de energia nem redução da densidade de energia.

Existem vários tipos de perdas por divergência:

- Divergência esférica;
- Divergência esférica alterada por fenómenos de refração;
- Divergência cilíndrica.

Para existir divergência esférica a fonte sonora tem que ser considerada pontual e o meio de propagação do som homogéneo, ilimitado e sem perdas de energia sonora.

A energia acústica emitida por uma fonte pontual vai dispersar-se em todas as direções, sob a forma de uma frente esférica. A diminuição de intensidade do som é proporcional ao aumento da área da esfera. Sendo a área de uma esfera igual a $4\pi r^2$, a diminuição da intensidade será proporcional ao quadrado do raio.



As perdas por **divergência esférica** são essencialmente função da distância à fonte sonora e independentes da frequência.

Figura 2.5 – Divergência esférica

Partindo do pressuposto que não há perdas de energia no meio, a potência (P) que atravessa as várias esferas será a mesma, havendo no entanto redução da densidade de potência.

$$P = \dot{A}rea \times I$$

$$P = 4\pi R_1^2 \times I_1 = 4\pi R_r^2 \times I_r \quad \text{então :}$$

$$\frac{I_1}{I_r} = \frac{R_r^2}{R_1^2} \quad \text{como} \quad R_1 = 1 \text{ jarda} \quad (2.3)$$

$$TL = 10 \log \frac{I_1}{I_r} = 10 \log R_r^2 \quad \Leftrightarrow \quad TL = 20 \log R_r \text{ dB}$$

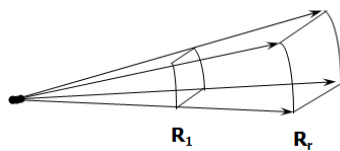


Figura 2.6 – Corte simulado do meio de propagação do som

Nas situações ideais a diminuição da energia de uma onda sonora é dada pela expressão:

$$TL = 20 \text{ Log } R_r \text{ (dB)} \quad (2.4)$$

Em condições mais realistas, os raios sonoros são afetados por fenômenos de reflexão e refração e a divergência esférica poderá ser alterada. Os gradientes de velocidade do som provocam nos raios sonoros curvaturas de propagação diferentes, o que origina perdas de propagação diferentes.

Na figura 2.5 a área interceptada é maior que na situação ideal. As perdas por divergência são maiores devido à presença da mesma quantidade de energia numa área maior. Por sua vez na figura 2.6 a área interceptada é menor que na situação ideal e as perdas também serão menores.



Figura 2.7 – $TL = 20 \log R$



Figura 2.8 – $TL > 20 \log R$



Figura 2.9 – $TL < 20 \log R$

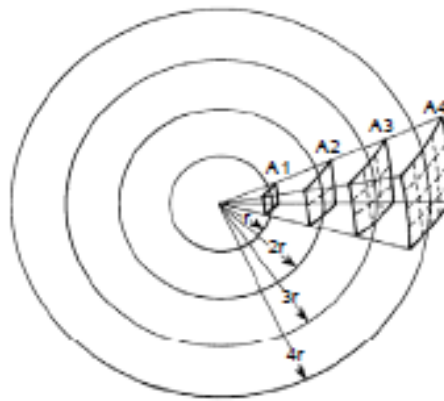


Figura 2.10 – Divergência de ondas esféricas provenientes de uma fonte pontual em um meio homogêneo e sem fronteiras.

A **divergência cilíndrica** ocorre quando o meio é limitado por duas superfícies, uma superior e outra inferior. Esses limites podem ser a superfície e o fundo do mar ou outros, como acontece nos canais de som em profundidade.

A divergência deixa de ser esférica uma vez que o som não consegue atravessar essas superfícies que limitam o meio. À medida que a distância à fonte sonora vai aumentando, a potência irradiada distribui-se por uma superfície cilíndrica, sendo o decréscimo da intensidade sonora, proporcional ao raio do cilindro.

As perdas devido à divergência cilíndrica são inferiores às da divergência esférica e, tal como estas, dependem da distância e são independentes da frequência

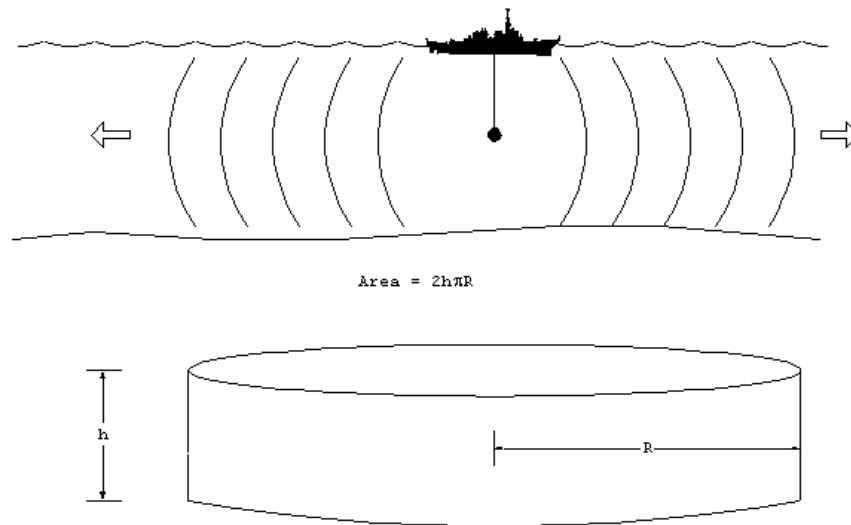


Figura 2.11 – Divergência cilíndrica

2.1.5. Atividade biológica

Os organismos marinhos são classificados em quatro grandes grupos: Plancton, que são as plantas e animais que não possuem locomoção própria; Necton, os peixes e os mamíferos que habitam o oceano; Benthos, os seres que habitam o fundo, fixos no mesmo e Neuston um grupo característico de espécies permanentemente associados com a parte inferior da interface ar-água (Castro, P., Huber, M., 2005).

A atividade biológica afeta a acústica submarina através da produção de ruído ambiente e na contribuição do aumento do ruído próprio de embarcações, devido à turbulência gerada pela aderência de organismos vivos aos cascos.

Um fenómeno biológico bastante marcante é a ocorrência da Camada Profunda de Espalhamento, DSL (*Deep Scattering Layer*). Esta camada é formada pelo acumulado de organismos marinhos numa determinada zona e acarreta uma forte dispersão do som. Esta camada é tipicamente encontrada em regiões temperadas e apresenta uma migração em profundidade durante o dia e em direção à superfície durante o período noturno. Ambas as migrações ocorrem devido à busca de uma luminosidade ótima para os seres que a formam.

2.2. O Som e a sua propagação no mar

O som gerado num corpo é o resultado de um distúrbio mecânico que se efetuou dentro deste. O distúrbio pode ter sido da forma transitória, de uma excitação de impacto, como, por exemplo, uma explosão ou o golpe de um sino. Por outro lado a perturbação pode tomar a forma de vibrações mais contínuas, como a voz, o tocar de um instrumento musical ou a movimentação regular de um equipamento mecânico. Em qualquer dos casos pode ser demonstrado que a fonte sonora se encontra em estado de vibração.

As perturbações produtoras de ondas sonoras acontecem dentro de gamas ou bandas contínuas de frequência, cuja largura depende da natureza da fonte sonora.

Para as vibrações contínuas as larguras de banda são muitas vezes estreitas e compostas por um número de frequências discretas, cujos valores mantêm um relacionamento numérico simples entre si.

A frequência mais baixa destas é chamada de frequência fundamental, e as restantes são denominadas harmónicos. O segundo harmónico possui uma frequência que corresponde ao dobro da frequência fundamental, o terceiro harmónico tem uma frequência tripla da fundamental, e assim sucessivamente.

Contudo, quando a excitação é de impacto, as frequências estendem-se ao longo de uma gama contínua possivelmente larga.

Para a maioria das aplicações sónicas, a fonte sonora corresponde essencialmente a uma superfície plana em oscilação devido a um movimento harmónico simples, praticamente numa frequência única.

A fonte transmite a energia vibratória às partículas, (por exemplo átomos ou moléculas), do meio material que se encontra em contacto físico imediato com ela. Esta energia move-se progressivamente pelo material da seguinte forma vibratória longitudinal.

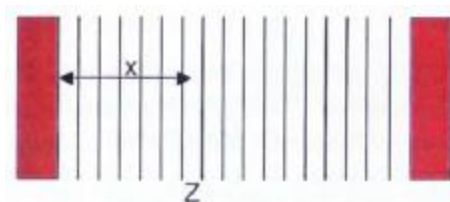


Figura 2.12 – Divisão do meio onde o som se propaga.

A figura 2.12 representa duas placas paralelas separadas pelo meio onde o som se propaga. A placa da esquerda atua como emissora, a vibrar com movimento harmónico simples e a placa da direita é a recetora.

Se considerarmos o meio de propagação subdividido num número elevado de fatias paralelas com espessuras iguais, então quando a fonte sofre um deslocamento de determinada amplitude para a direita, a fatia que se encontra em contacto imediato com ela, também sofre o mesmo deslocamento, de seguida ocorre o mesmo com a segunda fatia e o deslocamento é transmitido sucessivamente e sequencialmente de fatia em fatia até alcançar a superfície detetora.

Neste caso não se está a considerar nenhuma atenuação, é pois um caso ideal, no qual a amplitude emitida é igual à amplitude recebida.

À medida que a fase da vibração da fonte varia, também a amplitude de deslocamento sofre uma variação, tomando alternadamente valores positivos e negativos. O recetor e cada fatia sentem o mesmo fenómeno.

Dado que a passagem da energia de uma fatia para a outra demora um tempo pequeno mas finito, então a fase da vibração de cada fatia sofre uma variação, pequena mas finita, em relação à imediatamente anterior. Assim as vibrações (oscilações) sonoras demoram um determinado tempo a chegarem da fonte ao recetor. A velocidade das ondas apresenta um valor constante para um material particular e condições físicas específicas (por exemplo a temperatura constante) e este valor depende do módulo elástico e da densidade do material.

As ondas consideradas até agora são do tipo longitudinal, devido às vibrações das partículas no meio material terem o mesmo sentido e direção que a propagação sonora.

Este tipo de ondas longitudinais é o mais relevante para o estudo som e denominadas ondas compressionais (ou ondas de compressão), pelo facto das fatias imaginárias do meio onde se propagam estarem sujeitas alternadamente a esforços de compressão e de tensão.

Para um instante temporal determinado, as camadas (fatias) têm o aspeto da figura 2.13, onde os centros das regiões de compressão positiva e negativa vizinhas se encontram separados por um comprimento de onda.

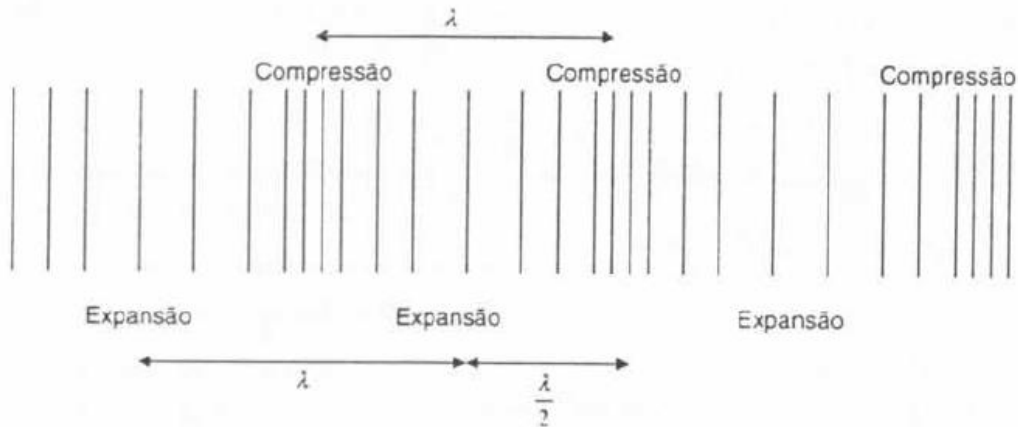


Figura 2.13 - Aparência (exagerada) das fatias do meio material, onde ocorre a propagação das ondas longitudinais

A distância entre o centro de uma região de compressão positiva e outro de compressão negativa é de meio comprimento de onda.

Uma outra forma de propagação é por ondas transversais, para a qual as vibrações das partículas no meio material fazem 90° com a direção de propagação das ondas. Neste caso, as fatias imaginárias do meio material ficam sujeitas a tensões de deslizamento transversal paralelo às superfícies imaginárias entre as fatias.

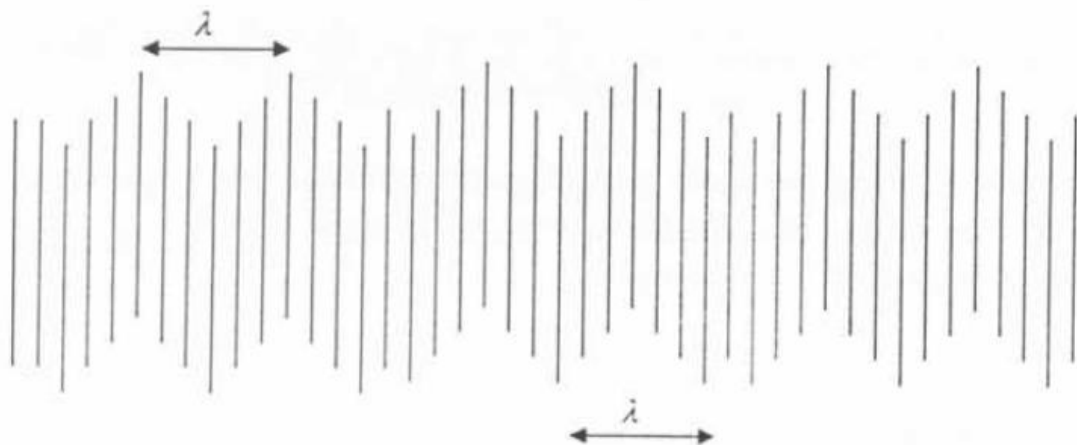


Figura 2.14 - Aparência (exagerada) das fatias do meio material, onde ocorre a propagação das ondas transversais

Em geral estas ondas transversais só têm lugar em sólidos ou à superfície separadora entre fluidos, devido ao facto que os gases e líquidos não servem de suporte a este tipo

de propagação no seu interior. A exceção a esta regra verifica-se em líquidos altamente viscosos, como óleos de lubrificação espessos, e só para distâncias muito curtas, da ordem de fricções de milímetros.

Por outro lado só foram até agora consideradas ondas planas, originadas por fontes de placas vibrantes ou cujas frentes de onda são paralelas à superfície plana da fonte sonora.

Quando a fonte tem dimensões que são menores que o comprimento de onda do som emitido, então o movimento de onda sonora pode ser considerado como uma propagação igual em todas as direções e as frentes de onda formam esferas, com a fonte emissora como centro comum a todas elas, neste caso falamos da propagação de ondas esféricas.

Quando a distância entre a fonte e o recetor é grande, a curvatura destas ondas na face recetora é pequena e podem ser consideradas aproximadamente como ondas planas.

Na maior parte de aplicações com som de baixa intensidade estão envolvidas propagações de ondas planas.

2.3. Equação da onda

A equação da onda é a base para o estudo da propagação sonora, é uma representação da perturbação das condições de equilíbrio de um meio material que provoca a variação de grandezas físicas. De seguida, abordarei três conceitos físicos, representados pelas equações descritas, que constituem a equação da onda.

2.3.1. Equação da continuidade

A equação da continuidade é relativa ao princípio da conservação de massa e explica o estado de um fluido em movimento a partir da distribuição da velocidade das partículas do fluido, da pressão e da densidade. Esta equação diz-nos que a variação da massa, no interior de uma região, deve ser idêntica ao fluxo de massa através da superfície que a limita.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0 \quad (2.5)$$

onde ρ é a densidade e \mathbf{v} é a velocidade da partícula.

Ou seja, se houver qualquer diferença de fluxo a entrar ou sair de um volume de controlo, deverá haver uma correspondente variação da densidade no interior desse mesmo volume.

2.3.2. Equação do movimento (Euler)

Esta equação é a aplicação da Segunda Lei de Newton nas partículas de um fluido perturbado e é válida apenas para pequenas oscilações. Estabelece que o produto da massa dessas partículas pela aceleração em qualquer direção é igual à força que atua na partícula nessa mesma direção. Esta expressa a ação de forças externas sobre um volume de controle e é dada por:

$$\rho_0 \frac{\partial v}{\partial t} + \nabla p = 0, \quad (2.6)$$

onde p é a pressão.

2.3.3. Equação de estado

A equação de estado refere a pressão como função da densidade e da entropia. No entanto, considera-se que as variações de pressão e densidade são pequenas e proporcionais, sendo a constante de proporcionalidade chamada de *bulk modulus*.

$$p = p(\rho, E), \quad (2.7)$$

Ocorrendo muito rapidamente uma variação de densidade com a passagem da onda acústica e, sendo o correspondente fluxo de calor desprezível, considera-se que a entropia do sistema fica constante, sendo portanto uma relação adiabática.

$$\frac{\partial E}{\partial t} + (v \cdot \nabla)E = 0, \quad (2.8)$$

2.4. Relações acústicas básicas

É de fácil conclusão, a partir das equações do sonar, que quanto mais reduzido o nível de ruído detetado melhor é o desempenho do sonar.

Esta redução pode ser conseguida pelo conhecimento do espectro frequência do ruído ambiente e do alvo (obstáculo), com o fim de selecionar a largura de banda do sistema de receção.

2.4.1. Ruído ambiente

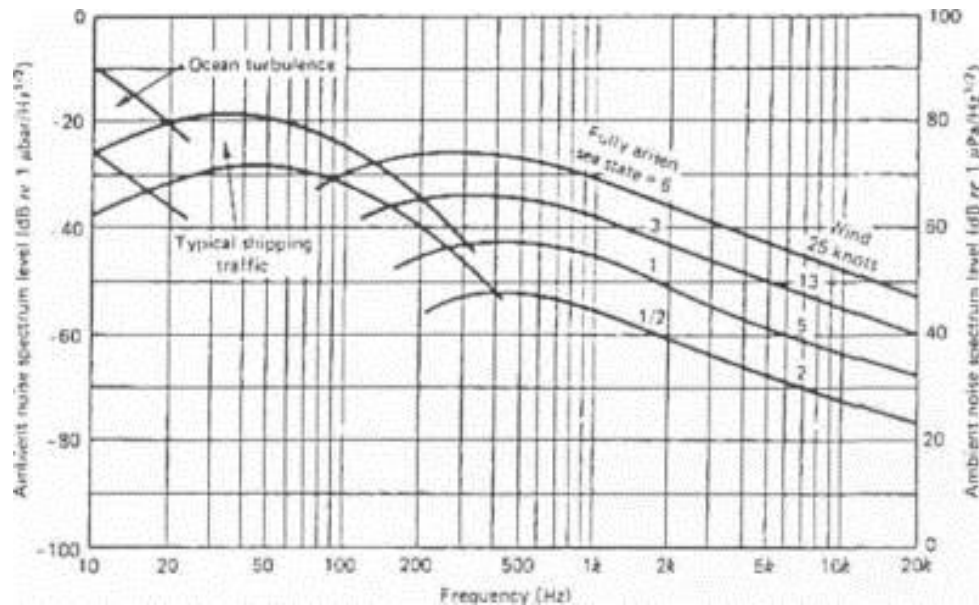


Figura 2.15 – Espectro do nível de ruído ambiente (ERA) em águas profundas (Wenz, 1962)

O nível de ruído detectado para o caso de a largura de banda ser suficientemente estreita, será dado por:

$$\text{NRD} = \text{ERA} + 10 \log \omega - \text{ID} \quad (2.9)$$

2.4.2. Ruído próprio

Este tipo de ruído é gerado pelo próprio recetor, que interfere com o sinal de eco captado.

O ruído próprio pode chegar ao recetor por via de propagação pela estrutura física de suporte do sistema e também pela propagação através do meio que é iluminado com o sinal acústico e que está em contacto simultâneo com o emissor e com o recetor. No caso de um sonar móvel, como o de um UUV, este tipo de ruído próprio tende a aumentar com a velocidade.

Para velocidades e frequências baixas, predominam os ruídos devido às máquinas, enquanto para frequências mais elevadas os ruídos devidos às hélices e de fluxo do meio começam a desempenhar um papel importante.

O ruído próprio é introduzido nas equações de sonar como um nível de espectro de ruído isotrópico equivalente, que expressa o nível de mascaramento do ruído próprio

na largura de banda do recetor, em termos do nível de uma quantidade equivalente de ruído ambiental.

2.4.3. O Decibel

A unidade de medida padrão utilizada na acústica submarina é o decibel (dB), que expressa uma razão entre intensidades acústicas (I) numa escala logarítmica. Dadas duas intensidades I_1 e I_2 , a relação entre elas, em dB, é dada por $10 \log (I_1/I_2)$. Os valores absolutos das intensidades são obtidos usando-se uma intensidade de referência, obtida a partir da pressão *rms* de referência, (p_{ref}), de $1 \mu Pa$ (micropascal), equivalente a $10^{-6} Nm^{-2}$.

A unidade decibel prevê uma forma conveniente de lidar com grandes variações de pressão e permite que quantidades sejam multiplicadas, simplesmente pela soma de suas respectivas equivalências em dB. Assim, por exemplo, uma onda com intensidade acústica 100 vezes maior do que a intensidade de referência teria um nível de $10 \log_{10} 100 = 20 dB$ re $1 \mu Pa$.

2.4.4. O efeito de Doppler

Quando ocorre um movimento relativo entre a fonte e o recetor das ondas sonoras, há uma diferença entre a frequência do sinal recebido e o emitido. Esta diferença em frequência é dependente das velocidades da fonte e do receptor. E o denominado efeito de Doppler, um efeito explicado em livros genéricos de acústica (Urick, 1983).

No estudo do som somos confrontados com os seguintes casos:

Se a fonte é estacionária e o recetor se afasta com velocidade, ocorre uma diminuição em frequência de $vf / (c-v)$, sendo c a velocidade do som e f a frequência. Quando o recetor se aproxima da fonte ocorre um incremento da frequência recebida da mesma quantidade referida.

Caso o recetor esteja estacionário e a fonte se afasta deste com velocidade v ocorre um decréscimo em frequência de $vf / (c-v)$. Por outro lado, se a fonte se aproxima do recetor fixo, ocorre um incremento em frequência de $vf / (c + v)$. Um exemplo bem conhecido em acústica deste fenómeno é o de decaimento abrupto do tom sonoro quando um carro passa.

Uma modificação do exemplo 2 é quando a fonte e o recetor enfrentam estacionariamente a mesma direção, e um obstáculo se aproxima ou afasta deste, com velocidade u . Assim ocorre um decréscimo em frequência de $2fu/(c+2u)$ quando o obstáculo se afasta da fonte, e um acréscimo em frequência de $2fu/(c-2u)$ quando este se aproxima.

Outro caso é quando ambos, recetor e fonte, se encontram submersos e estacionários, num fluido em movimento, com velocidade constante. A frequência mantém-se constante, mas ocorre uma variação na velocidade do som, sendo esta variação igual ao da velocidade do fluído ao longo da linha que liga a fonte ao recetor.

2.4.5. Intensidade do obstáculo

A intensidade do obstáculo (alvo) que reflete a onda acústica é determinada, principalmente, pela dimensão física do obstáculo, pela sua forma física, construção e a frequência do som que o ilumina.

Ainda pouco se conhece sobre a dependência da intensidade do obstáculo relativamente à frequência, para a maioria dos tipos de obstáculos. No entanto, regra geral, as frequências elevadas são mais favoráveis à classificação de obstáculos, pois os comprimentos de onda mais curtos permitem observar melhor a estrutura (superficial) dos obstáculos nos sinais de eco. Enquanto comprimentos de onda mais compridos levam à perda da maioria dos detalhes informativos de estrutura dos obstáculos no sinal de eco.

Reflecções de impulsos muito curtos, de alta frequência, revelam várias características do obstáculo, na forma de sinais de retorno discretos ou sobrepostos, enquanto a reflexão de um impulso de longa duração se aproxima mais do valor da intensidade do obstáculo medida em onda contínua.

2.4.6. Reverberação

Quando uma fonte acústica ilumina uma parte do meio à sua volta, podem acontecer dispersões do sinal por partículas, efeito do solo e outras presenças de heterogeneidades (irregularidades) que constituem fontes de sinais não desejáveis (reverberação), que competem com o sinal de eco que se pretende obter por reflexão nos obstáculos a detetar.

A obtenção do nível de reverberação é o cálculo do volume ou da superfície até à distância do obstáculo, de onde podem chegar dispersões do sinal até ao recetor, ao mesmo tempo (ou durante o mesmo intervalo de tempo) que o sinal de eco pretendido. Isto depende da duração do impulso, da diretividade, tanto da fonte sonora como do recetor, e da geometria do sistema sonar.

Se for conhecido o volume ou a superfície de iluminação acústica, então o nível de reverberação pode ser obtido por cálculo direto.

3. Sistemas Sonar

De todas as formas de radiação conhecidas, até aos dias de hoje, o som é a energia mecânica que melhor se propaga no mar. Devido às capacidades de propagação do som na água, o seu uso tornou-se a base científica do sonar e, os sistemas que o usam, de uma forma ou de outra são denominados sistemas sonar.

3.1. Breve enquadramento histórico

As primeiras referências da existência do som sob a superfície do mar datam de 1940, escritas num dos cadernos de Leonardo da Vinci: “Se parares o teu navio e colocares uma das extremidades de um longo tubo na água e a outra no ouvido, ouvirás navios a grandes distâncias de ti.” (T.G.Bell, 1962). Este é um bom exemplo de um sistema simples de sonar passivo, no entanto, não seria possível somente com esse tubo recolher informação relativa à direção.

Para se conseguirem criar sistemas complexos como os utilizados hoje em dia, foi necessário o apoio de vários estudos e descobertas no âmbito da física, nomeadamente, do fenómeno piezoelétrico, tendo sido creditada a sua descoberta a Jacques e Pierre Curie. Esta manifestação é relativa à capacidade que certos cristais têm de, quando sob stress, desenvolverem uma carga elétrica sobre as suas faces.

A palavra sonar é um termo Americano, inicialmente utilizado na Segunda Guerra Mundial, é um acrónimo de *SOund, NAvigation and Ranging*. Os Britânicos chamavam o sonar de ASDICS, que vem de *Anti-Submarine Detection Investigation Committee*. Desenvolvimentos posteriores do sonar incluíram o detetor de profundidade, *rapid-scanning sonar*, *sidescan sonar*, e o *within-pulse-electronic-sector-scanning* (WPRESS) sonar.

3.2. Caracterização do sonar

O sonar pode ter dois princípios de funcionamento:

- Sonar passivo;
- Sonar ativo

Os sistemas passivos utilizam um só trajeto da propagação sonora, uma vez que, se limitam a escutar o som emitido pelos alvos (Urlick, 1967).

Os sistemas sonar dizem-se ativos quando o som é gerado por um dos componentes do sistema, o projetor. As ondas sonoras propagam-se até embaterem num alvo, sendo, posteriormente, refletidas como ecos para um hidrofone, que converte sons em energia elétrica (Urlick, 1967).

Os sonares ativos podem ainda ser classificados em dois princípios de operação.

O primeiro princípio (figura 3.a) é o de ter um emissor e um recetor localizados lado a lado, o emissor emite um sinal e o sistema começa a contar o tempo que o eco, do sinal refletido pelo alvo, demora a chegar ao recetor. Assim, sabendo a velocidade de propagação do sinal no meio e o tempo que o eco do sinal demorou a chegar ao recetor, podemos determinar a distância ao alvo ou obstáculo.

O segundo princípio (figura 4.b) é o de usar só um transdutor e fazer comutação entre a função de emissor e de recetor, após emissão do sinal e receção do eco, respetivamente.



Figura 3.1 - Princípios de operação do sonar ativo

Tanto no sonar passivo como no ativo a dificuldade reside em detetar um sinal acústico desejado na presença do ruído existente no meio que rodeia o sistema.

Considerando que o nível do sinal a detetar é o nível de eco NE e o nível de ruído do meio é o nível de ruído detetado (NRD), então a equação do sonar é:

$$NE \geq NRD + LD \quad (3.1)$$

O limiar de deteção (LD) corresponde ao valor que o nível do eco tem de superar o nível de ruído detetado para permitir uma probabilidade de 50% de deteção dentro de uma probabilidade pré-especificada de falso alarme.

3.2.1. Sonar ativo

No sistema ativo o sinal é um impulso de energia acústica originado pelo emissor com um determinado nível de fonte NF . Este sinal propaga-se até ao alvo, sofrendo uma perda de transmissão PT no meio.

Uma fração do sinal incidente sobre o alvo é refletida, caracterizada pela intensidade de alvo IA , de novo para o recetor e sofre novamente uma perda de transmissão PT no meio onde se propaga.

No caso monoestático tanto a fonte de sinal como o recetor encontram-se no mesmo local, razão para que $TL = TL'$ e então o nível de eco é:

$$NE = NF - 2PT + IA \quad (3.2)$$

Por determinação do tempo t entre a emissão do impulso acústico e o regresso do eco deste, pode-se determinar a distância r ao alvo, uma vez que $r = ct / 2$.

No caso de um recetor de elevada direccionalidade também pode ser determinada a posição do alvo.

O nível de ruído detetado, no sonar ativo, pode ser dominado pelo ruído-ambiente ou pelo ruído do próprio sistema.

De seguida temos a equação do sonar ativo (monoestático) de ruído limitado.

$$NF - 2PT + IA \geq NR - ID + LD \quad (3.3)$$

O sonar ativo tem uma fonte que pode mascarar o sinal, que não está presente no sonar passivo, a reverberação. A reverberação é originada pela dispersão indesejada do sinal em obstáculos diversos e diferentes do alvo que se pretende detetar.

Neste caso, o nível de ruído detetado, é o nível de reverberação NRB

$$NRD = NRB \quad (3.4)$$

A combinação das equações (3.1), (3.2) e (3.4) dá-nos a equação do sonar ativo de reverberação limitada (monoestático)

$$NF - 2 PT + IA \geq NRB + LD \quad (3.5)$$

A dominância de um sistema de sonar ativo pelo ruído ou pela reverberação, depende da potência acústica, da distância e da velocidade do alvo obstáculo.

Esta dominância está ilustrada nas figuras 3.2 e 3.3.

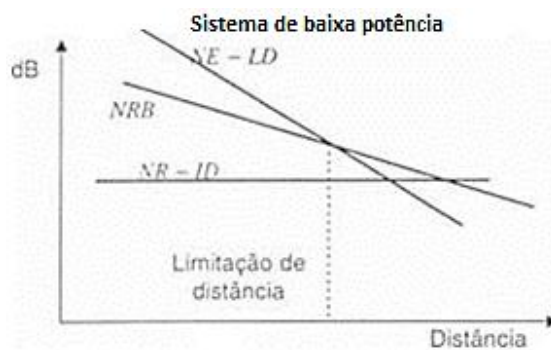


Figura 3.2 - Desempenho limitado por ruído

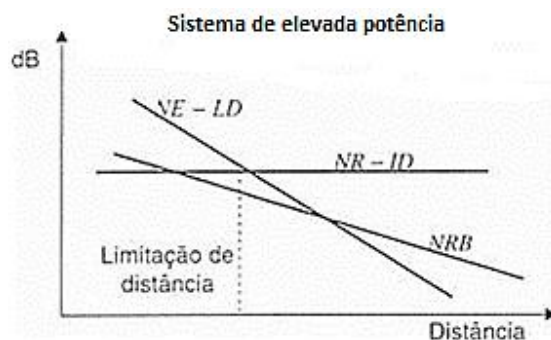


Figura 3.3 - Desempenho limitado por reverberação

Em geral, os sistemas de baixa potência estão limitados em ruído, dado que a gama de máxima deteção é atingida quando o nível do eco cai abaixo de um nível onde deixa de ser possível de o extrair, face ao ruído ambiente.

O aumento da potência acústica do sistema provoca o aumento do nível do eco, mas também do nível de reverberação, para uma determinada distância.

Mas, em geral, a reverberação decresce com o aumento da distância ao alvo e de forma mais acentuada que o nível do eco para a mesma distância.

Se a partir de uma determinada distância o nível do sinal de eco fica indistinguível na reverberação, diz-se que o sistema está limitado em reverberação.

3.3. Estudo de mercado

Foi realizado um estudo de mercado de forma a averiguar as possibilidades existentes para uma futura aquisição de um sonar com características que possibilitassem a integração num UUV. De todos os fornecedores contatados e sonares vistos, foram selecionados quatro. Os equipamentos que fazem parte desta avaliação são os considerados aptos para corresponder a todas as exigências que este projeto exige.

Os seguintes sistemas de sonar foram incluídos na avaliação:

- Kongsberg M3 SONAR - 500M;
- Kongsberg PulsAR;
- IMAGENEX SPORTSCAN;
- BlueView M900-2250;


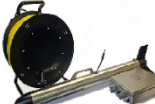






















































CHAVE					
Menos Favorável	➔ Mais Favorável	Kongsberg M3 SONAR - 500M	Kongsberg PULSAR	IMAGENEX SPORTSCAN	BlueView M900-2250
CRITÉRIOS DE AVALIAÇÃO					
Facilidades de Aquisição					
Custo do sistema					
Garantia					
Capacidades					
Frequências de Operação					
Alcance					
Resolução					
Campo de visão					
Taxa de atualização					
Opções disponíveis					
Portabilidade					
Facilidade de transporte					
Montagem					
Alimentação necessária					
Peso					
Manutenção					
Suporte técnico					

Tabela 1 – Avaliação dos sonares escolhidos

A tabela 1 trata-se de uma avaliação que teve por base as características descriminadas no apêndice I, bem como com as especificações técnicas detalhadas pelos fabricantes destes equipamentos.

4. Unmanned Underwater Vehicles

Veículos submarinos não tripulados (*Unmanned Underwater Vehicles* - UUV) são divididos em dois grupos de veículos, os veículos operados remotamente (*remotely operated vehicle* - ROV) e os veículos submarinos autônomos (*autonomous underwater vehicles* - AUV) (El-Hawary, 2001). Os ROV são controlados através de *inputs* de um operador, normalmente localizado num navio-mãe, acima da superfície da água. O AUV, por outro lado, funciona de forma autônoma, sem qualquer *input* do usuário durante a operação. São, portanto, mais difíceis de controlar. Alguns exemplos de UUV disponíveis comercialmente podem ser vistos na figura 4.1.

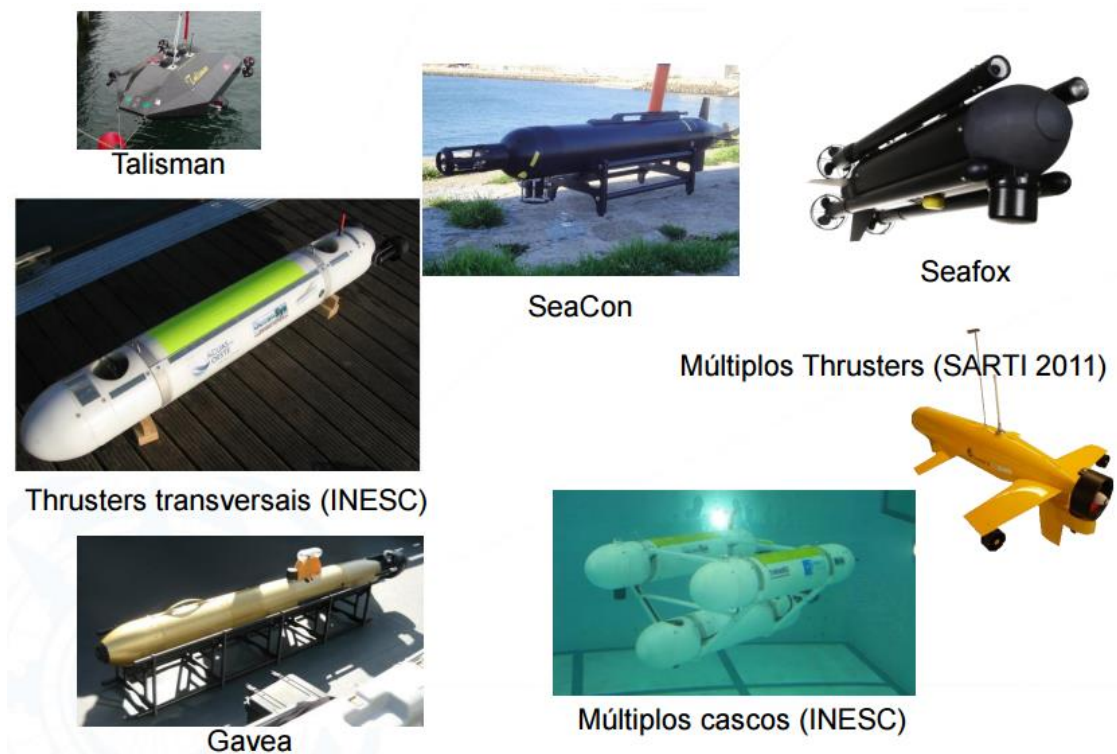


Figura 4.1 – Alguns exemplos dos UUV atuais

Na exploração submarina os ROV são mais populares por causa do controlo mais simples e dos *inputs* diretos do operador, enquanto na vigilância submarina e observação, os AUV são cada vez mais proeminentes.

A maior parte dos UUV disponíveis comercialmente hoje em dia, usam vários propulsores para um controle independente de todos os seis graus de liberdade (DoF), no entanto existem outros com menos liberdade de movimento, sendo a sua principal vantagem a redução do número de atuadores. A maioria dos UUV tem um momento de

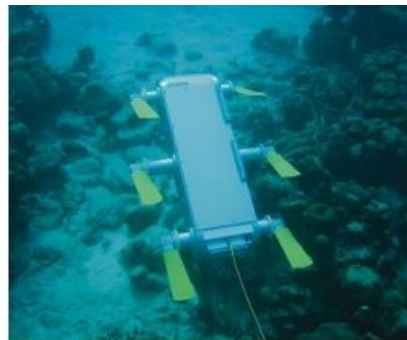
rolamento ao longo do eixo longitudinal causado pelos hélices. Este movimento de rolamento é maioritariamente impedido ou diminuído por características mecânicas no veículo, por exemplo, a colocação do centro de gravidade abaixo do centro de flutuabilidade ou por adição de aletas ou outros elementos sobre o casco. Outra das maneiras de eliminar este rolamento é utilizar um anel externo rotativo, que gira no sentido oposto ao rolamento natural da plataforma, fornecendo três *DoF*. Hélices, que são acoplados mecanicamente e são contra-rotação executado por um único motor, são também uma forma tradicional para cancelar este movimento, por exemplo, a maioria dos torpedos usam hélices contra-rotação.

Após pesquisa dos UUV disponíveis no mercado reparei que a maioria são demasiado volumosos e, em alguns casos, pouco adequados para a investigação em cavidades e espaços estreitos, as razões para que isto aconteça são várias: um UUV de tamanho pequeno permite apenas uma quantidade limitada de sensores e de carga útil; a presença de um cabo de ligação no bordo de fuga de ROV está propenso a ficar preso em ambientes estreitos ou em obstáculos; o tamanho do UUV geralmente limita a manobrabilidade, uma vez que quanto mais pequeno menos espaço existe para a instalação de mais propulsores.

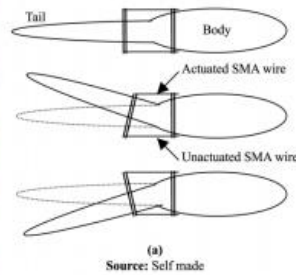
4.1. Propulsão biomimética

Nos tempos que correm tem sido dada especial atenção à biomimética, nomeadamente à propulsão em água por parte de algumas formas biológicas marinhas como polvos, peixes, etc. Dependendo do mecanismo de propulsão podem ser dividido em três grupos. Alguns exemplos, são mostrados na figura 4.2. O primeiro grupo usa o movimento de ondulação corporal e/ou uma barbatana caudal. Deste grupo destaca-se o projeto SABUVIS (Swarm of Biomimetic Underwater Vehicles for Underwater ISR), projeto desenvolvido pela Academia Naval Polaca e o Robo-Pike, outro peixe robótico originário do MIT. Um segundo grupo usa um conjunto de barbatanas emparelhadas, como é o caso do AQUA (Mcgill, Mechatronics Locomotion Lab, 2007) e do MADLEINE (MBARI, 2005). O terceiro e último grupo de mecanismos de propulsão biomiméticos são os inspirados nos movimentos de uma cobra, como é o caso da ACM-R5, com capacidade de locomoção tanto na terra como na água conseguida por meio de um

movimento de ondulação helicoidal, utilizando aletas com a resistência necessária (H. Yamada, 2005).



AQUA [Mcgills, 2007]



Source: Self made

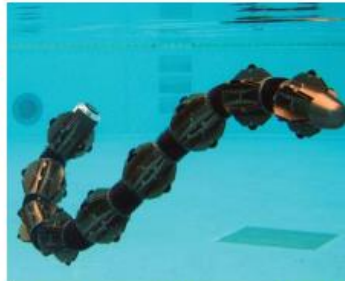


Source: Shinjo and Swain (2004)

Projeto SABUVIS (Academia Naval Polaca)



Madeleine [MBARI, 2005]



ACM-R5 [HiBot, 2005]



Robo-Pike [MIT, 2000]

Figura 4.2 – Alguns exemplos de veículos com propulsão biomimética

Veículos submarinos com propulsão biomimética têm percorrido um longo caminho e demonstrado muitas propriedades promissoras, mas ainda não são eficientes o suficiente para competir com os UUV. Além disso, requerem uma certa quantidade de espaço livre à sua volta para realizar o movimento de ondulação, não sendo, portanto, capazes de entrar em áreas confinadas.

4.2. Definição de tarefas

A Marinha Portuguesa tem vindo a aumentar o seu interesse na aquisição e emprego de UUV, quer seja para aplicação em missões de SAR, quer seja para reconhecimento, em ambiente tático, fora da linha de visão dos navios.

Num futuro próximo, espera-se também que venham a ser utilizados em ações de vigilância de docas, recolha de dados oceanográficos ou meteorológicos, ou simplesmente como plataformas móveis, espalhadas ao longo de toda a costa portuguesa, de apoio em situações de desastres marítimos.

Com este projeto pretende-se cumprir um dos principais desafios das missões SAR com UUV, o desenvolvimento de um sistema que permita a localização de naufragos. Para tal, o veículo a utilizar deverá ter capacidade de comunicação *wireless* a curtas/médias distâncias e boa autonomia. Deverá também ter espaço disponível que permita a instalação de vários sensores, entre os quais um sonar, de modo a existir redundância de métodos de aquisição de imagens/assinaturas de corpos humanos.

5. Metodologia e aplicações

Foi realizado um conjunto de ensaios em ambientes simulados, com o objetivo de averiguar a sensibilidade do equipamento ao longo do tempo e face a diferentes condições de propagações das ondas sonoras.

Além de testes realizados com seres humanos, são também utilizados outros objetos, como latas ou madeira. Desta forma será possível comparar as assinaturas sonar de um ser humano com a de outros objetos e, assim, projetar estratégias para a sua identificação e classificação.

5.1. Condições e objetivos dos testes

Os ensaios dividiram-se em duas partes, uma das partes foi realizada no tanque da Esquadilha de Submarinos e a segunda parte, numa piscina particular com pouca profundidade. Os ensaios em tanque, permitiram averiguar a eficiência de utilização de um ROV, equipado com um sonar *single-beam*, em missões de busca de corpos na superfície. Nos ensaios em piscina utilizou-se o sonar *sidescan* da SPORTSCAN e teve como objetivo efetuar várias leituras sonar com diferentes posições corporais e com recurso a objetos, de forma a construir uma boa base de dados. Posteriormente, esta base de dados servirá de fonte de comparação do algoritmo para as imagens captadas pelo sistema sonar/UUV em tempo real.

O tratamento e representação dos dados será um assunto abordado na tese do ASPOF EN-AEL Maia da Fonseca.

5.2. Esquemático utilizado

Os testes iniciais a efetuar terão a seguinte configuração:

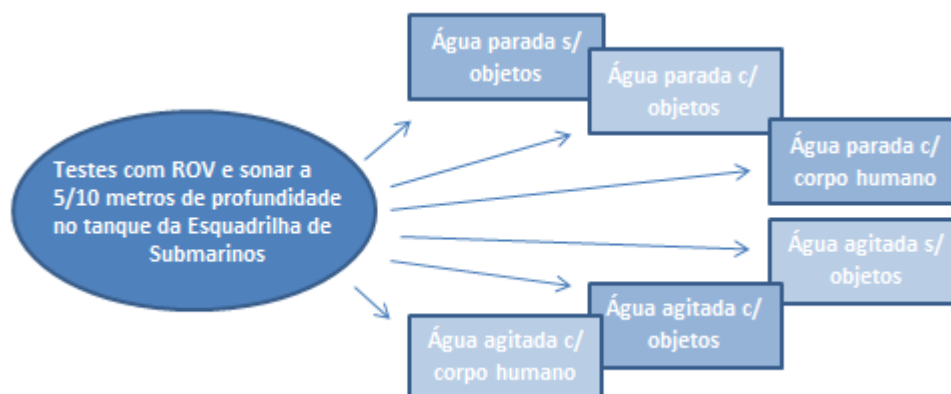


Figura 5.1 – Esquemático da configuração primária a executar

Posteriormente, torna-se necessário a recolha de imagens para construir a base de dados. O que implicará muito tempo despendido para obter o máximo de ecos de corpos possível e de outros objetos. Por conseguinte, será adotada numa segunda fase de testes, com a seguinte configuração:

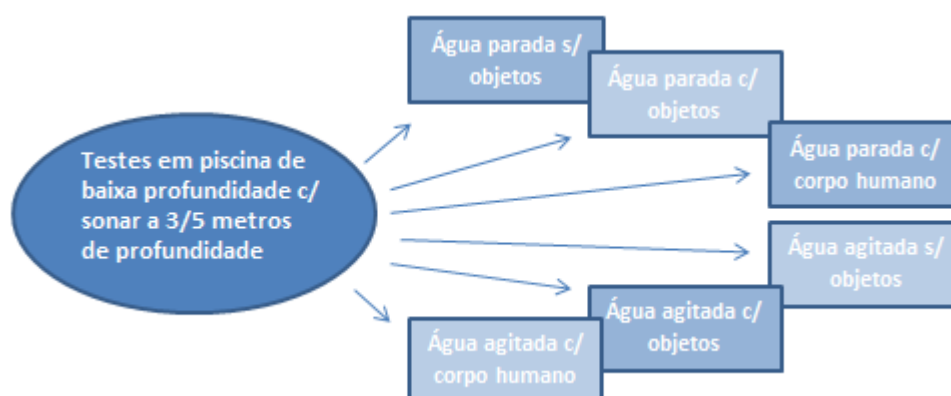


Figura 5.2 – Esquemático da configuração secundária a efetuar

Após a recolha dos dados de interesse, mencionados anteriormente, tornar-se-á necessário proceder à recolha de dados em mar aberto, recorrendo ao uso de um UUV. Sendo nesta fase, a melhor aproximação às situações reais de utilização de um sistema deste tipo.

O teste, abaixo descrito, será efetuado com o apoio do Destacamento de Mergulhadores Sapadores nº3 (DMS3) e utilizando o AUV GAVEA.



Figura 5.3 – Esquemático da recolha de dados a ser efetuada em situação de aplicação real

Espera-se recolher cerca de 20 amostras de cada parâmetro, pelo que a duração dos testes descritos anteriormente não será limitado em tempo, mas sim no número de amostras que pretendemos obter.

Após a recolha dos dados, em complemento com o tratamento dos dados, espera-se através do treino de uma rede neuronal elaborar um detetor ótimo. Instrumento este que terá como objetivo fazer uma análise concreta da superfície marítima, onde se encontre o UUV.

Este sistema deverá fornecer uma resposta do género:

- Encontra-se naufrago à deriva;
- Não se encontrou nenhum naufrago à deriva.

Assim cumpre o principal objetivo deste projeto, dando uma ideia concreta, da existência ou não de um naufrago e a sua localização, possibilitando a recolha com o fim da salvaguarda da vida humana.

5.3. Testes e resultados

Apresentam-se nesta seção os vários testes realizados sobre o emprego do ROV em missões SAR e a identificação e análise de um corpo humano na superfície utilizando um sonar. Estes testes foram organizados em função do local em que são feitos, nomeadamente: teste em tanque da Esquadilha de Submarinos (ES) e teste em piscina (BNL e privada).

De salientar que os resultados obtidos nesta secção foram conseguidos em parceria com o camarada ASPOF EN-AEL Maia da Fonseca e que também irá usar estes resultados na sua dissertação de mestrado.

5.3.1. Teste em tanque da ES

Este teste consistiu em averiguar a capacidade do veículo comunicar com a base, enviando dados e recebendo comandos, bem como verificar a sua manobrabilidade, com recurso ao modo de controlo remoto, a partir de um *joystick*. Estando descritos no Apêndice II.

Foi testado o envio de diversos comandos de atuação com diferentes intensidades no sentido de verificar a capacidade do ROV se deslocar para a frente, para trás, curvar para ambos os sentidos para vários raios de curvatura e rodar no próprio ponto.

Verificou-se que o ROV tem uma grande capacidade de locomoção e curvatura em ambos os sentidos, sendo capaz de rodar mantendo a sua posição, mesmo quando sujeito a forças de rotação elevadas. No entanto, o facto da comunicação com o veículo se fazer com recurso a um cabo, ligado diretamente ao ROV, limita muito as possibilidades da sua aplicação. É de referir também que, o sonar instalado neste veículo não possui discriminação suficiente para diferenciar um corpo do ruído existente na linha de superfície.

Concluiu-se com este teste que o UUV a usar terá de ser um AUV, com capacidade de comunicação *wireless* a curtas/médias distâncias. Relativamente ao sonar a utilizar nos próximos testes, ficando desde já excluído o que se encontra instalado no ROV do DMS3.

5.3.2. Teste em piscina (BNL e privada)

Os testes realizados nas piscinas estão descritos no Apêndice III, tendo consistido na identificação dos parâmetros de transmissão mais favoráveis e na recolha de imagens para construção de uma base de dados.

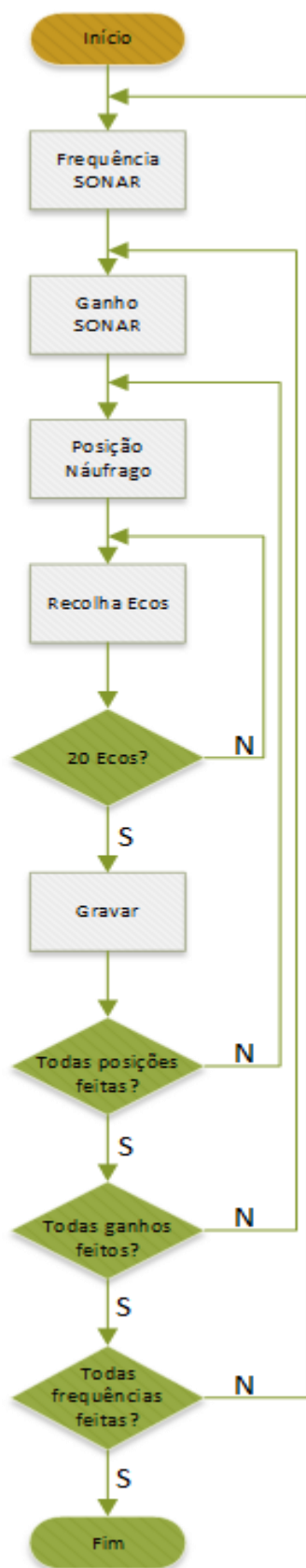


Figura 5.4 – Fluxograma recolha de assinaturas de corpo humano

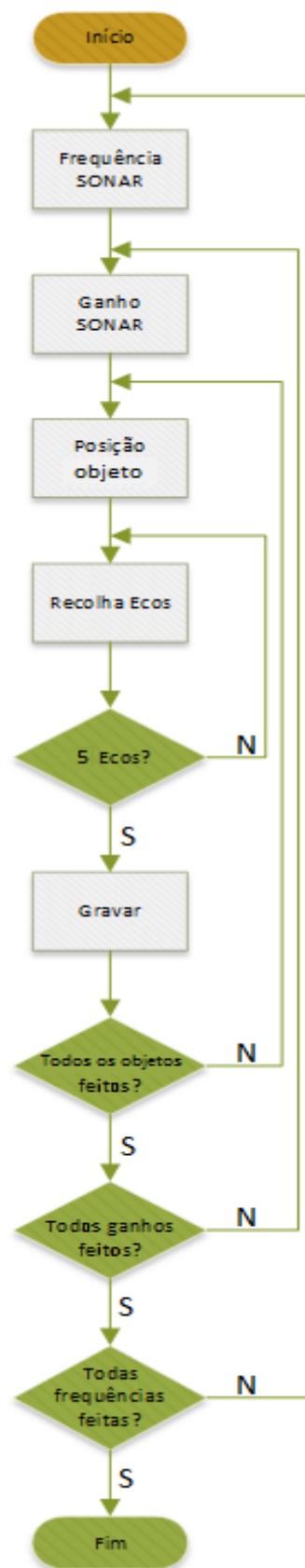


Figura 5.5 – Fluxograma recolha de assinaturas de objetos

No fluxograma da figura 5.4 verifica-se o método usado para a recolha das assinaturas sonar do corpo humano. O teste é iniciado após instalado e ligado o sonar *sidescan* da SPORTSCAN e configurados os parâmetros da sua transmissão para o primeiro registo. De seguida, inicia-se 20 passagens, à superfície, de um dos envolvidos nos testes. Para estas passagens recorreu-se ao uso de um linha guia, atada a cada uma das extremidades da piscina, de modo a reduzir as reverberações associadas ao movimento do corpo. Esta tentativa de reduzir os efeitos do movimento tem relevância, uma vez que, na situação real, o sonar é que se vai movimentar por estar instalado no AUV.

No final das 20 passagens, o registo feito é gravado e catalogado, dando-se início a novo registo com outras configurações de transmissão.

Os parâmetros de transmissão utilizados em cada uma das 20 passagens foram:

- Frequência - 800 kHz, ganho - 20 dB, alcance - 5 m;
- Frequência - 800 kHz, ganho - 30 dB, alcance - 5 m.
- Frequência - 330 kHz, ganho - 20 dB, alcance - 5 m;
- Frequência - 330 kHz, ganho - 30 dB, alcance - 5 m;

Para a obtenção de assinaturas de objetos, simulando lixo passível de ser encontrado à deriva no mar, utilizou-se o método descrito no fluxograma da figura 5.5. Foi em tudo semelhante ao método de recolha de assinaturas do corpo humano, no entanto foram recolhidas apenas 5 de cada objeto e para cada um dos parâmetros de transmissão. Os objetos utilizados foram:

- Tábua de madeira;
- 3 Baldes de alumínio (presos entre si);
- Chapéu-de-chuva (armação em metal e cabo de madeira).



Figura 5.6 – Tábua de madeira utilizada para a base de dados



Figura 5.7 – Baldes de alumínio utilizados para a base de dados



Figura 5.8 – Chapéu-de-chuva utilizado para a base de dados

O conjunto de dados recolhidos utilizando objetos, reveste-se de uma enorme importância pois, através deles, poder-se-á desenvolver um sistema robusto, que não apresente falhas.

De seguida são apresentadas as assinaturas recolhidas, daquelas que podem ser consideradas as posições mais importantes, do ponto de vista da eficácia do algoritmo que o camarada Maia da Fonseca irá utilizar, de modo a tentar extrair as suas curvas características.



Figura 5.9 – Posição pensada para a posição de barriga para baixo

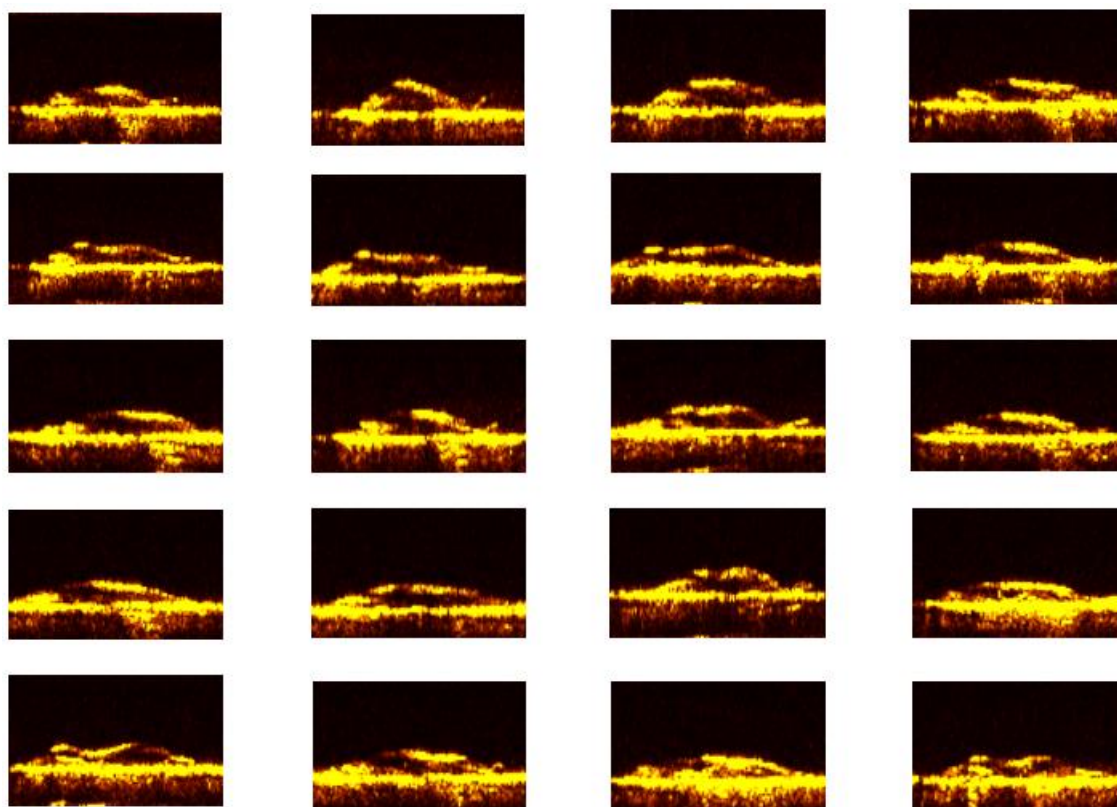


Figura 5.10 – Assinaturas sonar de um corpo de barriga para baixo na superfície (800 kHz/20 dB)

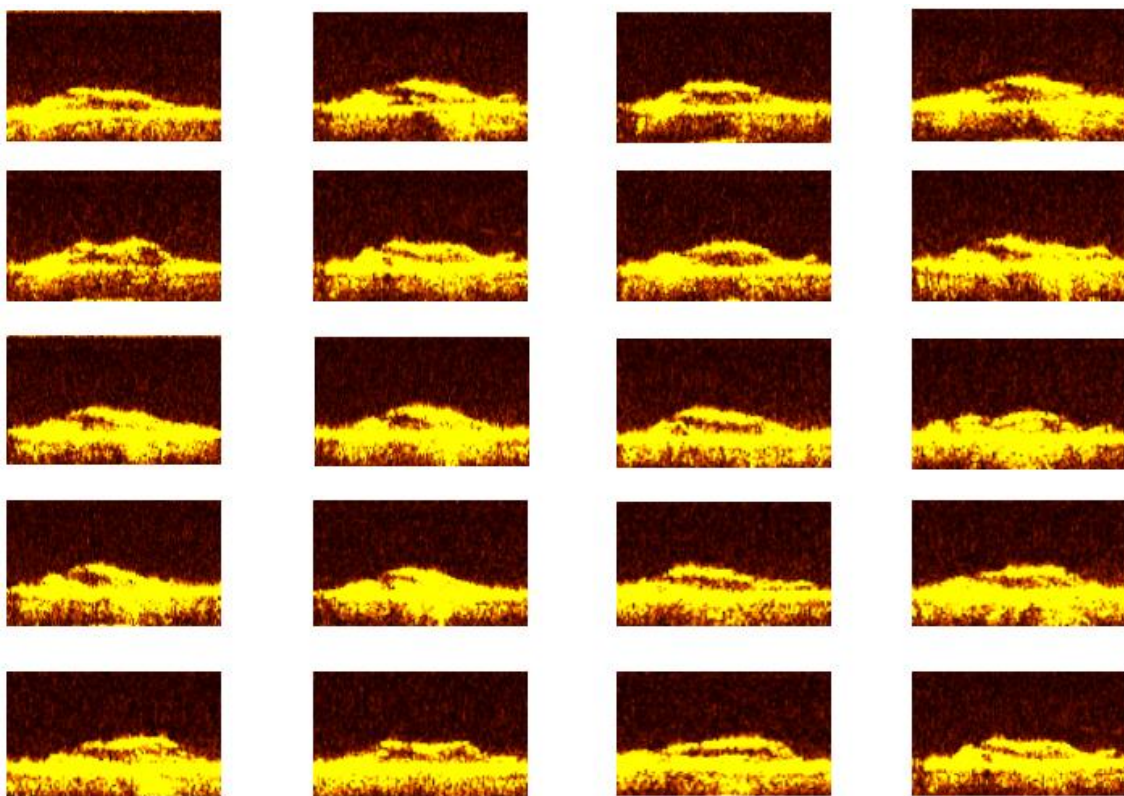


Figura 5.11 – Assinaturas sonar de um corpo de barriga para baixo (crawl) na superfície (800 kHz/30 dB)

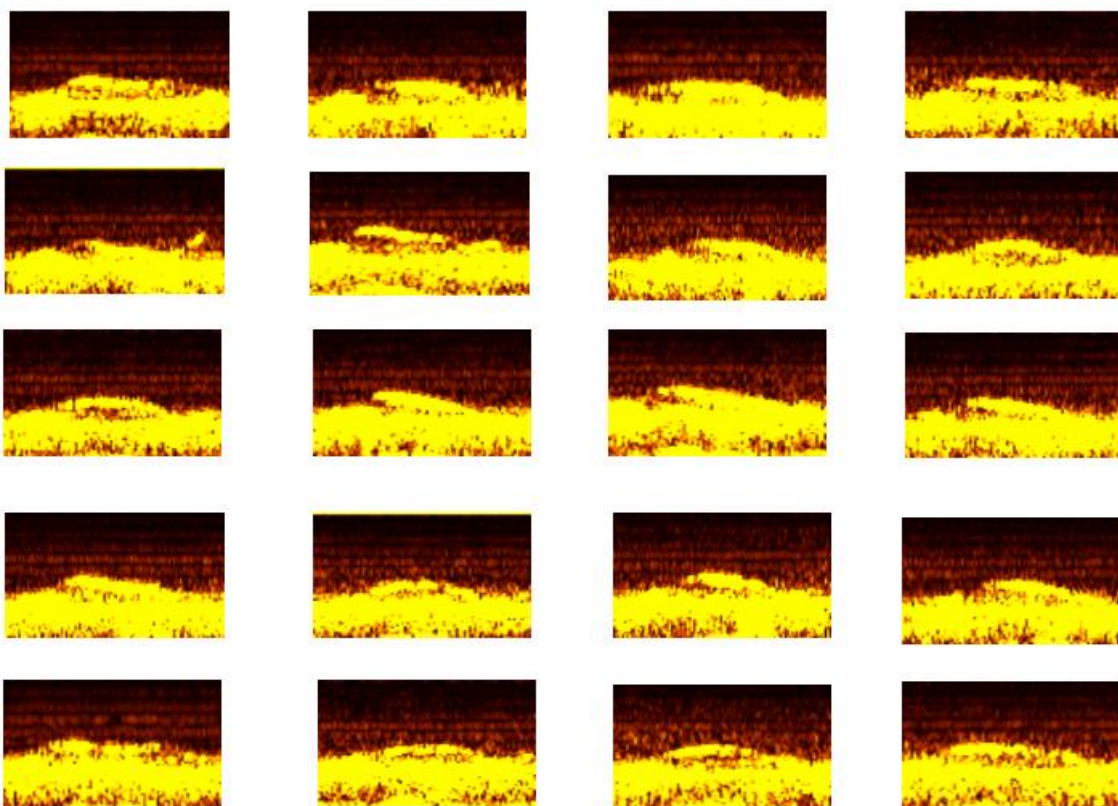


Figura 5.12 – Assinaturas sonar de um corpo de barriga para baixo (crawl) na superfície (330 kHz/20 dB)

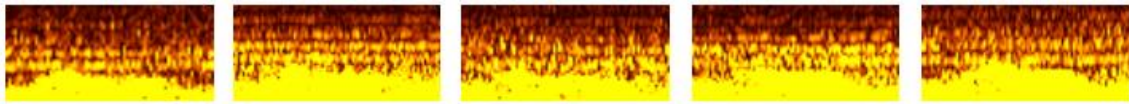


Figura 5.13 – Assinaturas sonar de um corpo de barriga para baixo (crawl) na superfície (330 kHz/30 dB)

Para a transmissão a 330 kHz e ganho 30 dB, o ruído é tão amplificado que se torna impossível diferenciar visualmente um corpo humano ou qualquer objeto na linha de água.

As cinco imagens apresentadas nas figuras 5.13, 5.18 e 5.23 foram testadas no algoritmo desenvolvido pelo Maia da Fonseca, tendo-se concluído que, esta configuração de transmissão do sonar *sidescan* da SPORTSCAN, não é viável.

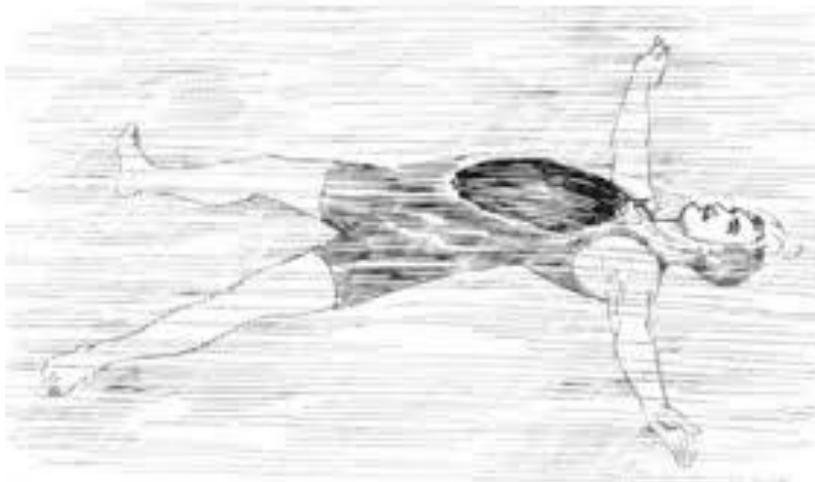


Figura 5.14 - Posição pensada para a posição de costas

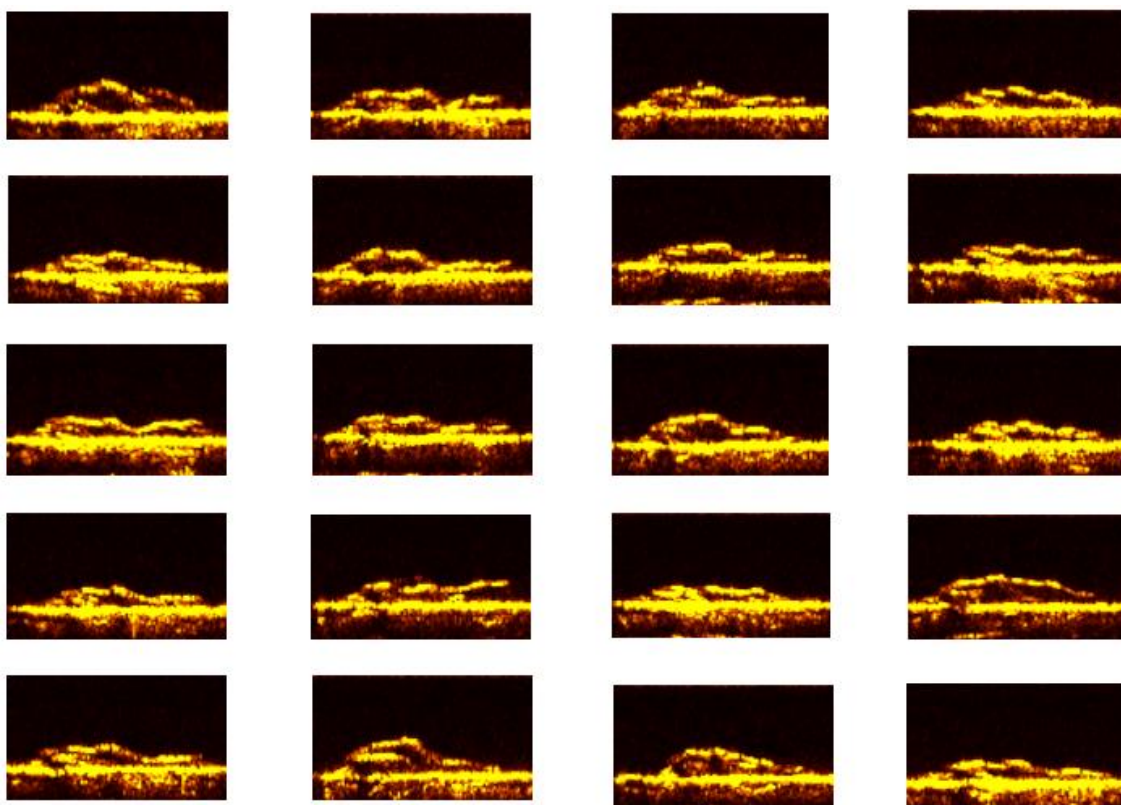


Figura 5.15 – Assinatura sonar de um corpo de costas na superfície (800 kHz/20 dB)

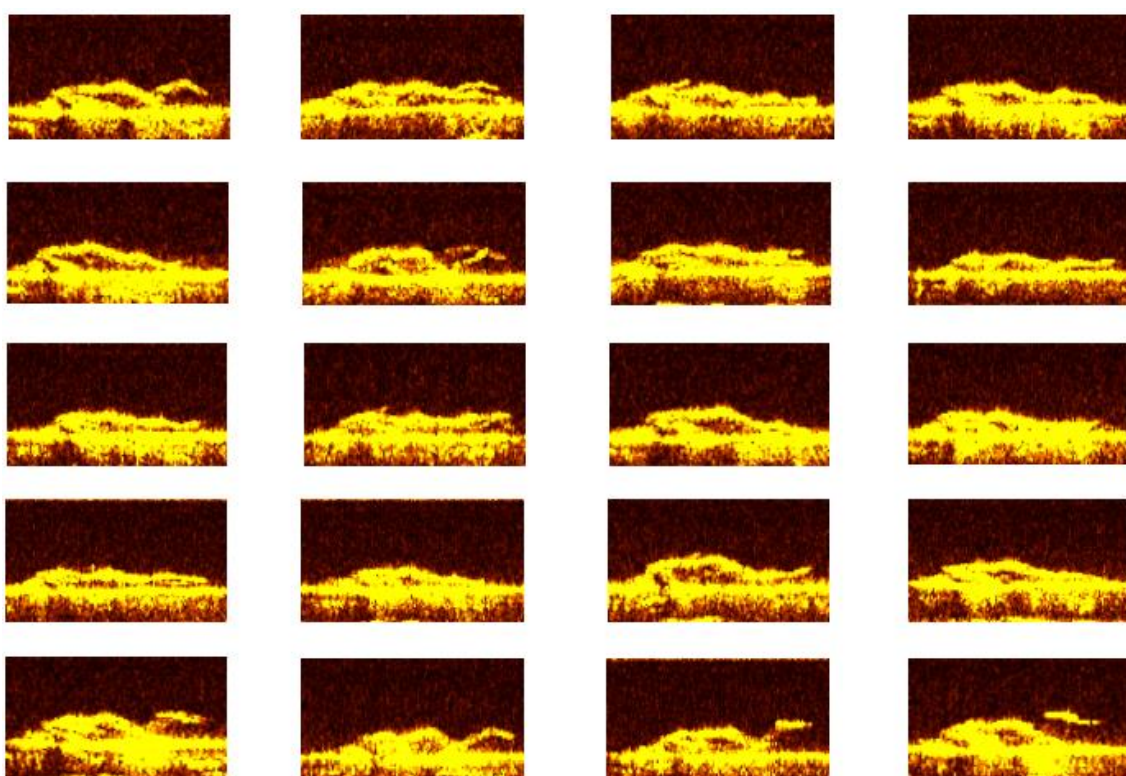


Figura 5.16 – Assinatura sonar de um corpo de costas na superfície (800 kHz/30 dB)

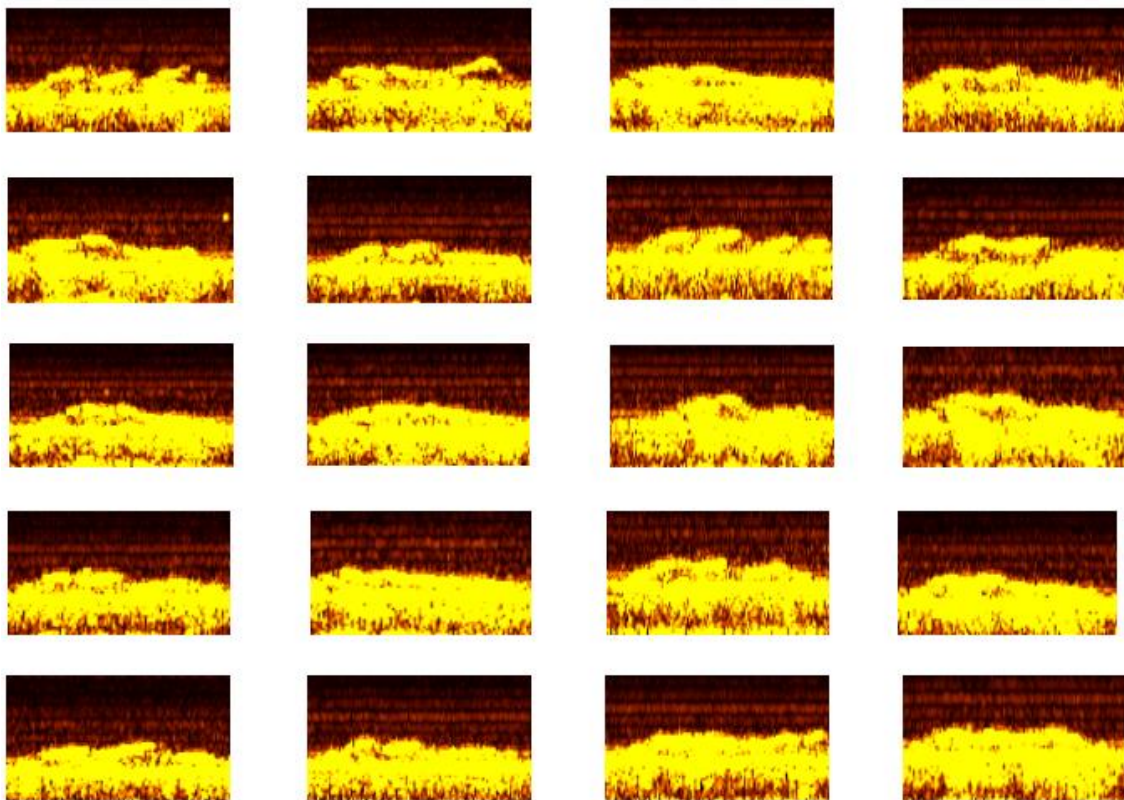


Figura 5.17 – Assinatura sonar de um corpo de costas na superfície (330 kHz/20 dB)

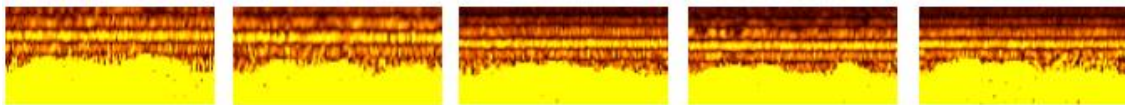


Figura 5.18 – Assinatura sonar de um corpo de costas na superfície (330 kHz/30 dB)



Figura 5.19 – Posição pensada para a posição de lado

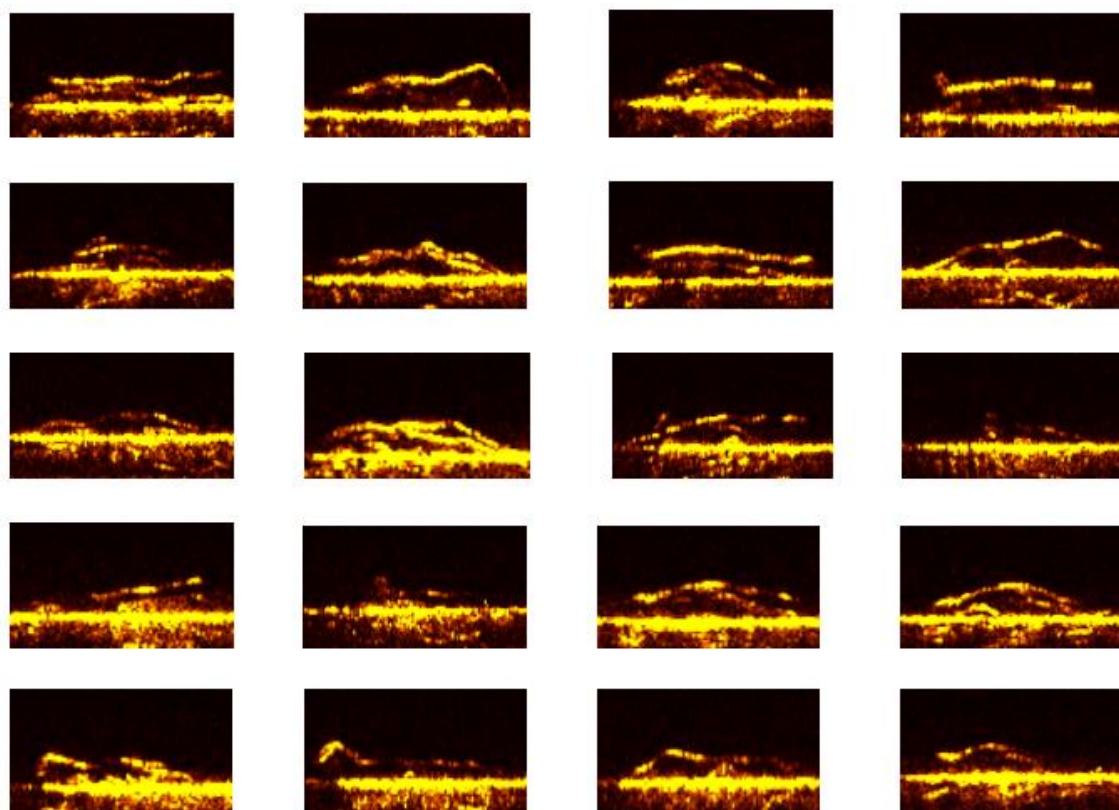


Figura 5.20 – Assinatura sonar de um corpo de lado na superfície (800 kHz/20 dB)

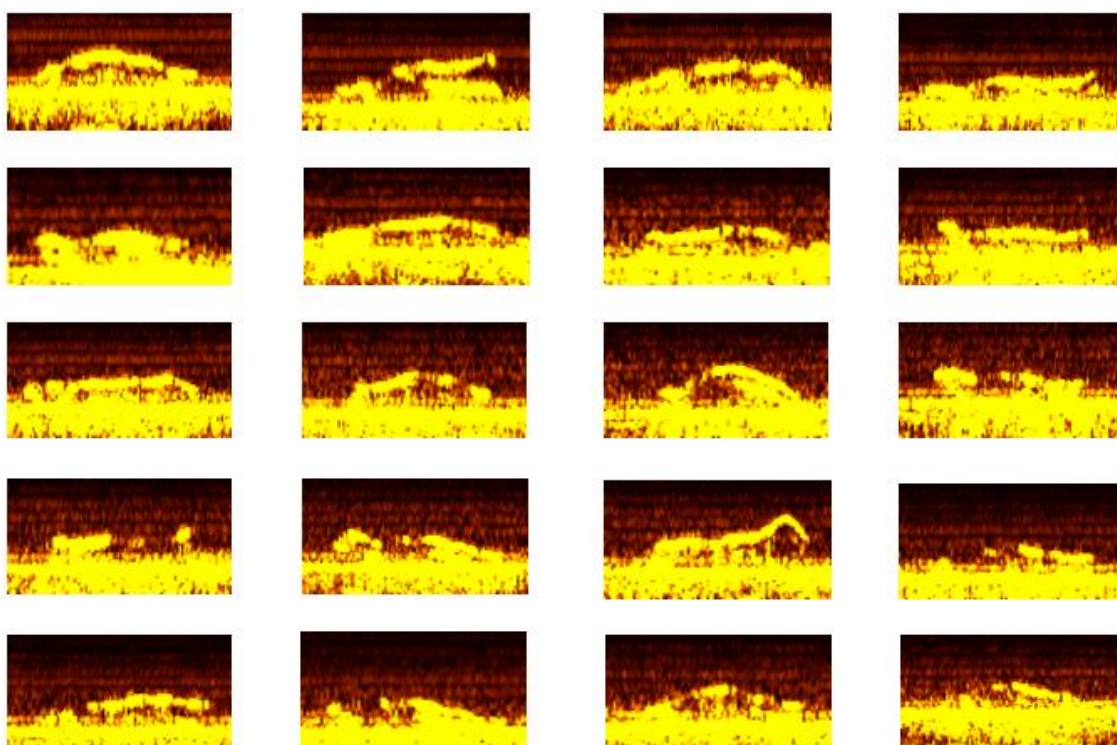


Figura 5.21 – Assinatura sonar de um corpo de lado na superfície (800 kHz/30 dB)

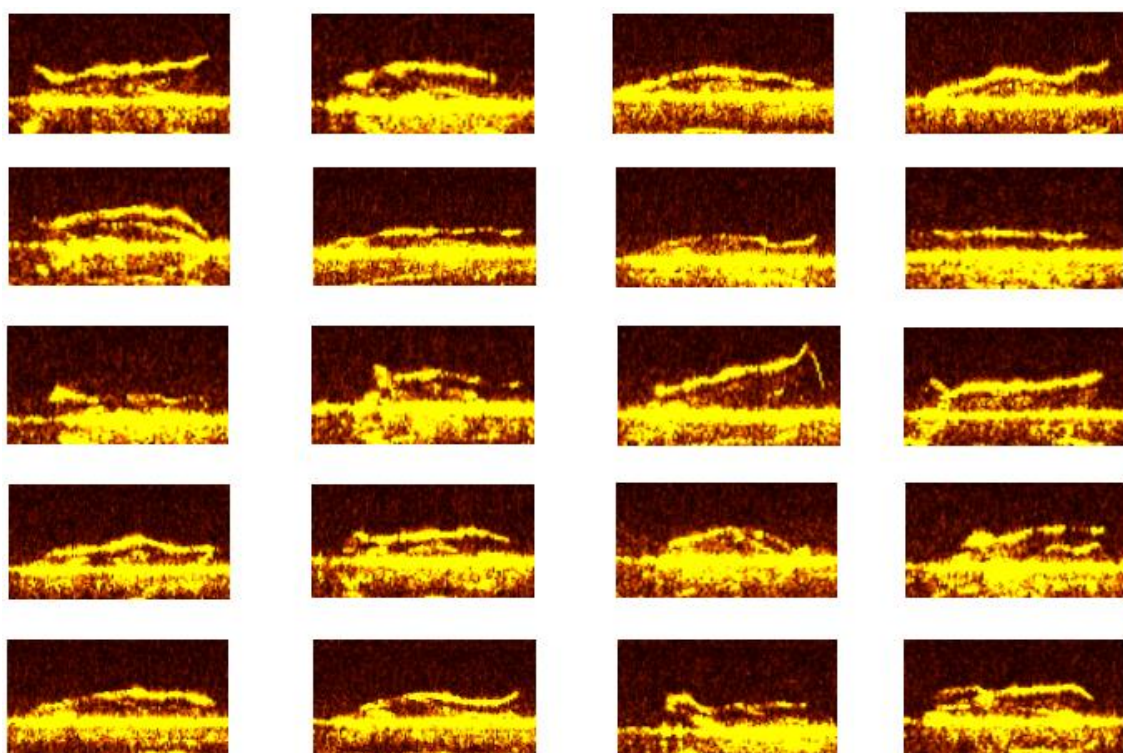


Figura 5.22 – Assinatura sonar de um corpo de lado na superfície (330 kHz/20 dB)

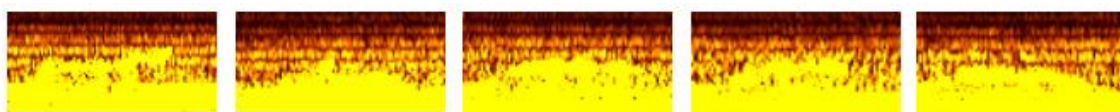


Figura 5.23 – Assinatura sonar de um corpo de lado na superfície (330 kHz/30 dB)



Faltou a recolha de assinaturas de um corpo na posição vertical, conforme a figura 5.24 demonstra. Apesar de ser uma posição possível de se verificar numa situação real, as condições dos ambientes simulados não o permitiram, devido às profundidades limitadas e a distância mínima que seria necessário garantir entre o sonar e o corpo.

Figura 5.24 – Posição pensada para a posição de pé

De seguida, são apresentadas as assinaturas recolhidas dos objetos utilizados.

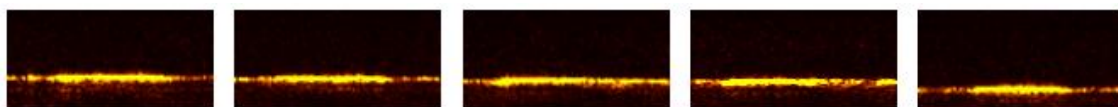


Figura 5.25 – Assinatura sonar de uma tábua de madeira na superfície (800 kHz/20 dB)

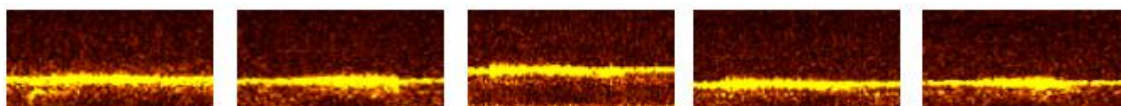


Figura 5.26 – Assinatura sonar de uma tábua de madeira na superfície (800 kHz/30 dB)



Figura 5.27 – Assinatura sonar de uma tábua de madeira na superfície (330 kHz/20 dB)

Repare-se que a assinatura da tábua de madeira não é facilmente diferenciada da linha de água. As propriedades da madeira são amplamente reconhecidas a nível do som. Absorve uma parte importante da energia das ondas sonoras que recebe, com a consequente redução da poluição acústica. Percebe-se assim o porquê de a figura 5.25, em comparação com a 5.28, ser uma imagem tão limpa.

Analisando estes dados, percebeu-se que caso um naufrago esteja sobre uma tábua, de modo a sobreviver por mais tempo dentro de água enquanto espera por ajuda, o sistema de deteção possivelmente falhará.

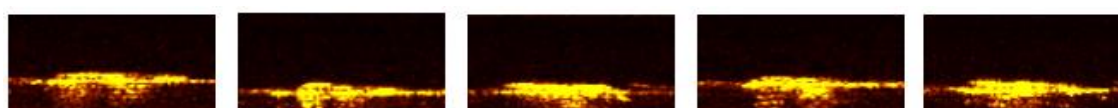


Figura 5.28 – Assinatura sonar de 3 baldes de alumínio na superfície (800 kHz/20 dB)



Figura 5.29 – Assinatura sonar de 3 baldes de alumínio na superfície (800 kHz / 30 dB)



Figura 5.30 – Assinatura sonar de 3 baldes de alumínio na superfície (330 kHz/20 dB)

Relativamente à assinatura dos baldes de alumínio, contrariamente ao que se verificou nas da tábua de madeira por este material ser bastante refletor do som, a distinção visual que se faz em relação ao corpo humano é nas suas curvas características.

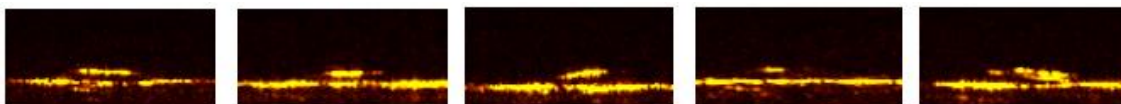


Figura 5.31 – Assinatura sonar de um chapéu-de-chuva na superfície (800 kHz/20 dB)

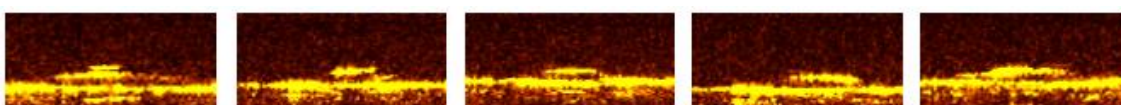


Figura 5.32 – Assinatura sonar de um chapéu-de-chuva na superfície (800 kHz/30 dB)

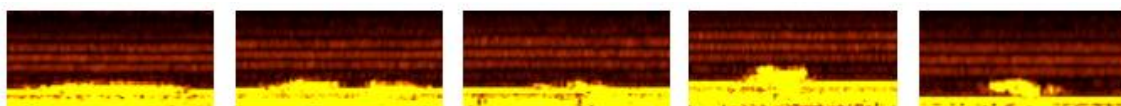


Figura 5.33 – Assinatura sonar de um chapéu-de-chuva na superfície (330 kHz/20 dB)

Por último, recolheram-se assinaturas de um chapéu-de-chuva com o cabo de madeira para cima, ficando só a armação meio submersa.

Com a recolha destas assinaturas sonar de diferentes objetos percebi o contraste destes em relação ao do corpo humano.

Conclusões

Nesta dissertação de mestrado em Ciências Militares Navais, na especialidade de Engenheiros Navais, ramo de Armas e Eletrónica, desenvolvida durante o ano letivo de 2014/15, os objetivos propostos foram atingidos. Tendo sido estudada a teoria de propagação sonora e todos os problemas associados à utilização de um sonar *upward looking*; os sistemas autónomos subaquáticos, a evolução dos mesmos e identificados os vários tipos de veículos existentes; os diversos tipos de sonar, os dados adquiridos das experiências realizadas e as suas conclusões.

Todo o estudo foi maioritariamente desenvolvido com recurso ao sonar de varrimento lateral Imagenex SportScan, usado experimentalmente, que é uma das bases fundamentais desta dissertação uma vez que é este que permite observar o meio. Tendo-se dado ênfase ao ROV e ao AUV GAVEA, visto serem estes veículos que a Esquadilha de Submarinos possui e que foram disponibilizados para o desenvolvimento desta dissertação.

Este trabalho começou com uma breve introdução do tema, bem como o devido enquadramento no projeto ICARUS, no âmbito do CINAV e a definição dos objetivos pretendidos.

No capítulo 2, procurou-se dar as noções necessárias para a compreensão de todos os conceitos que viriam a ser abordados nos capítulos 3, 4 e 5.

No capítulo 3 abordou-se a teoria sonar e o tipos de sonar passíveis de virem a ser utilizados na criação do sistema de deteção de naufragos. Foi também demonstrado o estudo de mercado realizado e respetivas conclusões. De todos os tipos de sonar estudados, encontram-se em comparação dois sonares *multibeam* e dois *sidescan*.

No capítulo 4 foram abordados os conceitos de UUV, ROV e AUV. Tendo ficado explícito que o veículo a utilizar, devido às características necessárias, deveria ser um AUV. Neste capítulo, como complemento, foram referidos também os UUV com propulsão biomimética que se encontram a ser desenvolvidos na atualidade.

No capítulo 5 demonstraram-se as experiências realizadas e os cenários de teste, assim como os objetivos e conclusões.

A experiência no tanque descrita no capítulo 5, demonstrou que o ROV não será um solução viável. Não só pela necessidade de existir um operador a operá-lo em tempo real, mas também pela sua fraca capacidade de percorrer longos trajetos a profundidades constantes.

O ROV do DMS3 é também limitado relativamente à interface de comunicações entre operador/ROV, uma vez que é feita a partir de um cabo da *SeaCon*, o que não permiti que este se distancie muito da base de operações.

Relativamente às experiências em piscina com o sonar *sidescan* da *SPORTSCAN*, comparativamente ao sonar que equipa o ROV (*singlebeam*), demonstrou apresentar maior capacidade de discriminação de corpos e objetos. Foram recolhidas e analisadas varias assinaturas de corpos humanos e de objetos, tendo sido possível diferenciar com erro reduzido um corpo na linha de água e dos objetos utilizados.

O trabalho que agora finaliza constitui um contributo para o conhecimento das potencialidades dos sistemas sonar, bem como, uma solução viável para problemas reais da Marinha Portuguesa e de todos aqueles que operam no mar.

Trabalhos futuros

Como propostas para trabalhos futuros, sugere-se:

- Desenvolvimento de um protótipo, utilizando o AUV Gavia e um sonar *multibeam* montado em modo *upward looking*;
- Realização de testes na BNL, numa zona do rio que seja abrigada, de preferência recorrendo ao sistema Gavia/*multibeam*;
- Pensar e desenvolver a interface de comunicações entre a base de operações e o AUV, bem como nos procedimentos que o sistema deverá tomar em caso de localização de um naufrago;
- Fazer mais recolha de assinaturas de cada uma das posições do corpo humano referidas, de forma a enriquecer a base de dados. Bem como de outros objetos, que se possam encontrar à deriva no mar;
- Realizar mais testes em ambiente simulado e real, de modo a validar o sistema de deteção de naufragos.

Bibliografia

ABAWI, A.T., 2002, "An Energy Conserving one-way coupled mode propagation model" *J.A.S.A.*, v. 111, n. 1 (Jan), pp. 160-167.

AINSLIE, M.A, 2004, "The Sonar Equation and the Definitions of Propagation Loss", *J.A.S.A.*, v. 115, n. 1 (Jan), pp. 131-134.

ALFORD, R.M., KELLY, K.R., BOORE, D.M., 1974, "Accuracy of Finite Difference Modeling of the Acoustic Wave Equation", *Geophysics*, v. 39, n. 6 (Dec), pp. 834-842.

ALVES, A.M.V., 1997, Investigações sobre a Propagação da Onda Sonora por Modos Normais em Águas Rasas. Tese de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

BUCKER, H.P., 1970, "Sound Propagation in a Channel with Lossy Boundaries", *J.A.S.A.*, v.48, n. 5, pp. 1187-1194.

BUCKINGHAM, M.J., 1990, "An Analytical Solution for Benchmark Problem 1: The Ideal Wedge", *J.A.S.A.*, v. 87, n. 4 (Apr), pp. 1511-1513.

BREKHOVSKIKH, L.M., LYSANOV, Y.P., 2003, *Fundamentals of Ocean Acoustics*. 3ed. New York, AIP PRESS, Springer.

CASTRO, P., HUBER, M. ,*Marine Biology*, 5ª ed., McGraw-Hill, 2005

CERJAN, C., KOSLOFF, D., KOSLOFF, R., et al, 1985, "A Nonreflecting Boundary Condition for Discrete Acoustic and Elastic Wave Equations", *Geophysics*, v. 50, n.4 (apr), pp. 705-708.

CHIU, C.S., 1994, "Downslope Modal Energy Conversion", *J.A.S.A.*, v. 95, n. 3 (Mar), pp. 1654-1657.

CLAY, C.S., MEDWIN, H., 1977, "*Acoustical Oceanography: Principles and Applications*", 1ed. New York, John Willey & Sons, Inc.

CLAYTON, R., ENGQUIST, B., 1977, "Absorbing Boundary Conditions for Acoustic and Elastic Wave Equations", *Bulletin of the Seismological Society of America*, v. 67, n. 6 (Dec), pp. 1529-1540.

COATES, R., 2002, The Advanced Sonar Course. Further Topics in Underwater Acoustics. New York, Seiche.com Ltd.

COHEN, G., JOLY, P., 1996, "Construction and Analysis of Fourth-Order Finite Difference Schemes for the Acoustic Wave Equation in Nonhomogeneous Media", *SIAM Journal on Numerical Analysis*, v. 33, n. 4 (aug), pp. 1266-1302.

COLLINS, M.D., 1992, "A Self Starter for the Parabolic Equation Method", *J.A.S.A.*, v. 92, n. 5 (Apr), pp. 2069-2074.

COLLINS, M.D., 1993, "A Split-Step Padé Solution for the Parabolic Equation Method", *J.A.S.A.*, v. 93, n. 4 (Apr), pp. 1736-1742.

COLLINS, M.D., 1994, "Generalization of the Split-Step Padé Solution", *J.A.S.A.*, v. 96, n. 1 (Jul), pp. 382-385.

COSTA, O.M., 1996, *Um Estudo sobre a Propagação do Som no Mar*. Tese de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

DEAVENPORT, R.L, 1966, "A Normal Mode Theory of an Underwater Acoustic Duct by Means of Green's Function", *Radio Science*, v. 1, n. 6 (Jun), pp. 709-723.

DINAPOLI, F.R., DEAVENPORT, R.L., 1980, "Theoretical and Numerical Green's Function Field Solution in a Plane Multilayered Medium", *J.A.S.A.*, v. 67, n. 1(Jan), pp. 92-105.

EL-HAWARY, F., 2001, "The Ocean Engineering Handbook", CRC Press LLC,

EVANS, R.B., 1983, "A Coupled Mode Solution for Acoustic Propagation in a Wave Guide with Stepwise Depth Variations of a Penetrable Bottom", *J.A.S.A.*, v. 74, n. 1 (Jul), pp. 188-195.

EVANS, R.B, GILBERT, K.E., 1985, "Acoustic Propagation in a Refracting ocean Wave Guide with an Irregular Interface", *An International Journal of Computers & Mathematics with Applications*, v 11, pp 795-805.

ETTER, P.C., 2002, "*Underwater Acoustic Modeling and Simulation*", 3 ed, New York. Spon Press.

FELSEN, L.B., 1990, "Benchmarks: An Option for Quality Assessment", *J.A.S.A.*, v. 87, n. 4(Apr), pp. 1497-1498.

FERLA, C.M., PORTER, M.B., JENSEN, F.B., 1993, *C-SNAP: Coupled SACLANTCEN normal mode propagation loss model*, SACLANTCEN SM-274.

FERREIRA, R.S., 2002, *Modelagem da Propagação do Som em águas Rasas*. Tese de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

FRISK, G.V., 1994, *Ocean and Seabed Acoustics. A Theory of Wave Propagation*. New Jersey, P T R Prentice Hall.

GALANTE, G.M.F, 2000, *Análise de Desempenho do Programa MOATL – Propagação em Águas Rasas*, IPqM 013-0208-RT/00.

GRAVES, R.D., NAGL, A., UBERALL, H., 1975, "Range-Dependent Normal Modes in Underwater Sound Propagation: Application to the Wedge-Shaped Ocean", *J.A.S.A.*, v. 58, n. 6 (Dec), pp. 1171-1177.

HALL, D.E., 1987, *Basic Acoustics*. New York, Harper & Row.

HIGHAM, C.J., TINDLE, C.T., "Coupled Perturbed Mode Over a Sloping Penetrable Bottom", *J.A.S.A.*, v. 114, n. 6 (Dec), pp. 3119-3124.

INGENITO, F., FERRIS, R.H., KUPERMAN, W.A., et al, 1978, *Shallow Water Acoustics*, NRL Report 8179.

JENSEN, F.B., KUPPERMAN, W.A., 1980, "Sound Propagation in a Wedge-Shaped Ocean with a Penetrable Bottom", *J.A.S.A.*, v. 67, n. 5 (May), pp. 1564-1566.

JENSEN, F.B., KUPPERMAN, W.A., 1982, "Optimum Frequency of Propagation in Shallow Water Environments", *J.A.S.A.*, v. 73, n. 3 (Mar), pp. 813-819.

JENSEN, F.B., 1988, "Wave Theory Modeling: A Convenient Approach to CW and Pulse Propagation Modeling in Low-Frequency Acoustics", *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, v. 13, n. 4 (Oct), pp. 186-197.

JENSEN, F.B., FERLA, C.M., 1990, "Numerical Solutions of Range-Dependent Benchmark Problems in Ocean Acoustics", *J.A.S.A.*, v. 87, n. 4 (apr), pp. 1499-1510.

JENSEN, F.B., KUPPERMAN, W.A., PORTER, M.B., et al, 1994, *Computational Ocean Acoustics*. New York, AIP Press.

JENSEN, F.B., 1998, "On the Use of stairs Steps to Approximate Bathymetry Changes in Ocean Acoustic Models", *J.A.S.A.*, v. 104, n. 3 (Sep), pp. 1310-1315.

KATSNELSON, B.G., PETNIKOV, V.G., 2002, *Shallow-Water Acoustics*. London, Springer & Praxis

KINSLER, L.E., FREY, A.R., COPPENS, A.B., et al, 1982, *Fundamentals of Acoustics*. 3 ed. New York, John Wiley & Sons.

KNOBLES, D.P., STOTTS, S.A., KOCH, R.A., 2003, "Low Frequency Coupled Mode Sound Propagation Over a Continental Shelf ", *J.A.S.A.*, v. 113, n. 2 (Feb), pp. 781-787.

KOCH, R.A., RUTHERFORD, S.R., PAYNE, S.G., 1983, "Slope Propagation: Mechanisms and Parameter Sensitivities", *J.A.S.A.*, v. 74, n. 1 (Jul), pp. 210-218.

LABIANCA, F.M., 1973, "Normal Modes, Virtual Modes and Alternative Representations in the Theory of Surface-Duct Sound Propagation", *J.A.S.A.*, v. 53, n. 4, pp. 1137-1147.

LEE, D., SCHULTZ, M.H., 1995, *Numerical Ocean Acoustic Propagation in Three Dimensions*. New Jersey, World Scientific.

LEE, D., MCDANIEL, S.T., 1987, "Ocean Acoustic Propagation by Finite Difference Methods", *An International Journal of Computers & Mathematics with Applications*, v 14, n. 5, pp 305-423.

LURTON, X., 2002, *An Introduction to Underwater Acoustic: Principles and Applications*. London, Springer-Praxis.

MACKENZIE, K.V., 1981, "Nine Term Equation for Sound Speed in the Oceans", *J.A.S.A.*, v.33, n. 4, pp. 1498-1504.

MARTINS, C.J., 2004, *Condições Iniciais em Propagação de Ondas Elásticas através do Método dos Elementos Finitos nos Domínios do Tempo e da Freqüência*. Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

MEDWIN, H., CLAY, C.S., 1998, *Fundamentals of Acoustical Oceanography*. New York, Academic Press.

MILLER, J.F., INGENITO, F., 1975, Normal Mode Fortran Programs for Calculating Sound Propagation in the Ocean, NRL Memorandum Report 3071.

MILLER, J.F., STEPHEN, N.W., 1980, Modal Acoustic Transmission Loss (MOATL): A Transmission Loss Computer Program Using a Normal Model of the Acoustic Field in the Ocean, NRL Report 8429.

NAGL, A., UBERALL, H., 1978, "Adiabatic Mode Theory of Underwater Sound Propagation in a Range-Dependent Environment", *J.A.S.A.*, v. 63, n. 3 (Mar), pp. 739-749.

NARDIM, M., GLANGEAUD, F., MAUJARY, D., 1998, "1-200 HZ Wave Propagation in Shallow Water", *Oceans Conference Proceedings*, v.1, pp. 390-394.

PIERCE, A.D., 1964, "Extension of the Method of Normal Modes to Sound Propagation in an Almost-Stratified Medium", *J.A.S.A.*, v. 37, n. 1 (Jan), pp. 19-27.

PIERCE, A.D., 1982, "Guided Mode Disappearance During Upslope Propagation in Variable Depth Water Overlying a Fluid Bottom", *J.A.S.A.*, v. 72, n. 2 (Aug), pp. 523-531.

PORTER, M.B., JENSEN, F.B., FERLA, C.M., 1991, "The Problem of Energy Conservation in One-Way Models", *J.A.S.A.*, v. 89, n. 3 (Mar), pp. 1058-1067.

REYNOLDS, A.C., 1978, "Boundary Conditions for the Numerical Solution of Wave Propagation Problems", *Geophysics*, v. 43, n. 6 (oct), pp. 1099-1110.

ROBINSON, A.R., LEE, D., 1994, *Oceanography and Acoustic. Prediction and Propagation Models*. New York, AIP Press.

ROCHA, A.P., 1997, Aplicação de Técnica de Inversão para a Determinação da Posição de uma Fonte Sonora Monocromática em Movimento Retilíneo Uniforme no Interior de um Guia de Ondas através de Coincidência de Modos Normais (Matched-Mode). Tese de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

RUTHERFORD, S.R., Hawker, K.E., 1979, "An Examination of the Influence of the Range Dependence of the Ocean Bottom on the Adiabatic Approximation", *J.A.S.A.*, v. 66, n. 4 (Oct), pp. 1145-1151.

SMITH, G.D., 1978, *Numerical Solution of Partial Differential Equations. Finite Difference Methods*. 2 ed., Oxford, Clarendon Press.

STEPHEN, R.A, 1990, "Solutions to Range-Dependent Benchmark Problems by the Finite Difference Method", *JASA*, v. 87, n. 4 (Apr), pp. 1527-1534.

STICKLER, D.C., 1975, "Normal-Mode Program with Both the Discrete and Branch Line Contributions", *J.A.S.A.*, v.57, n.4 (Apr), pp. 856-861.

STURM, F., FAWCETT, J.A., 2003, " On the Use of Higher-Order Azimuthal Scheme in 3-D PE Modeling ", *J.A.S.A.*, v. 113, n. 6 (Jun), pp. 3134-3145.

THOMPSON, I.J., 1980, "Mixing of Normal Modes in a Range-Dependent Model Ocean", *J.A.S.A.*, v. 69, n.5 (May), pp. 1280-1289.

THONSON, D.J., 1990, "Wide-Angle Parabolic Equation Solutions to Two Range-Dependent Benchmark Problems", *J.A.S.A.*, v. 87, n.4 (Apr), pp. 1514-1520.

THORPE, S., 1996, "Oceanography: An Illustrated Guide", CRC Press.

TINDLE, C.T., STAMP, A.P., 1976, "Virtual Modes and the Surface Boundary Condition in Underwater Acoustics", *Journal of Sound and Vibration*, v. 49, n. 2, pp. 231-240.

URICK, R.J., 1983, *Principles of Underwater Sound*. 3 ed. London, Mc Graw-Hill Book Company.

WEINBERG, H., BURRIDGE, R., 1974, "Horizontal Ray Theory for Ocean Acoustics", *J.A.S.A.*, v. 55, n. 1 (Jan), pp. 64-79.

WYLIE, C.R., 1995, *Advanced Engineering Mathematics*, 6 ed. New York, Mc Graw-Hill-Inc.

YEVICK, D., THOMSON, D.J., 1997, "A Hybrid Split-Step/Finite Difference PE Algorithm for Variable Density Media", *J.A.S.A.*, v. 101, n. 3 (mar), pp. 1328-1335.

ZAKARIA, A., PENROSE, J., THOMAS, F., et al., 2000, "The Two Dimensional Numerical Modelling of Acoustic Wave Propagation in Shallow Water", *Australian Acoustical Society Conference*, Joondalup, Australia, 15-17 November.

ZHOU, J.X., 1985, "Normal Mode Measurements and Remote Sensing of Sea-Bottom Sound Velocity and Attenuation in Shallow Water", *J.A.S.A.*, v. 78, n.3 (Sep), pp.1003-1009.

Apêndice I – Sonares escolhidos e características principais

	<i>Alcance</i>	<i>Resolução</i>	<i>Frequência</i>	<i>Tipos de pulso</i>	<i>Modos transmissão</i>	<i>Campo de visão</i>	<i>Largura do feixe vertical</i>	<i>Taxa de actualização</i>	<i>Custo de aquisição</i>
Kongsberg M3 SONAR - 500M	0.2 m - 150 m	1 cm	500 kHz	CW, CHIRP	variable vertical beamwidth, eiQ	120° a 140°	3°, 7°, 15°, 30°	> 40 Hz	30,406.6 €
Kongsberg PulSAR	100 m (CW)/150 m (FM)	1 cm	550 kHz to 1 MHz	CW, FM	Sidescan	50° x 0.5° - 0.4°	-	25 pulsos / 5 pulsos (30 m/300 m alcance)	-
IMAGENEX SPORTSCAN	15 m - 120 m	6 cm	330 kHz a 800 kHz	-	Sidescan	330 kHz: 1.8° x 60° 800 kHz: 0.7° x 30°	-	-	8,225.7 €
BlueView M900-2250	100 m (900 kHz) 10 m (2250kHz)	1.3 cm (900 kHz) 0.6 cm (2250kHz)	900 kHz - 2250 kHz	CW	Multibeam	130°	0.18°	Up to 25 Hz	31,459.4 € a 38,024.8 €

Apêndice II – Teste no tanque da ES c/ ROV e Sonar single-beam

Objetivo

Esta atividade experimental teve como principal objetivo a verificação da capacidade do ROV e do sonar que o equipa na execução de missões do tipo SAR.

Procedimento experimental

Duração da experiência (preparação): 4 Horas.

Material

- Equipamento: -ROV;
- Fontes de alimentação;
 - Equipamento de controlo do ROV;
 - Operador do ROV;
 - Mergulhador do Destacamento de Mergulhadores Sapadores nº3;
 - 3 Boias pequenas;

Procedimento

- 1- Ligar o equipamento de controlo e o ROV;
- 2- Colocar o ROV no tanque;
- 3- Iniciar a transmissão do sonar;
- 4- Verificar se existe total controlo e capacidades do ROV;
- 5- Verificar se a profundidade a que se encontra o sonar corresponde à dos dados recolhidos;
- 6- Colocar mergulhador na água, no centro do tanque;
- 7- Fazer várias passagens com o ROV sob o mergulhador a 5/10 metros de profundidade;
- 8- Analisar ecos recebidos;
- 9- Colocar as boias presas entre si na água, no centro do tanque;

10- Fazer várias passagens com o ROV sob o conjunto de boias a 5/10 metros de profundidade;

11- Colocar somente uma boia na água, no centro do tanque;

12- Fazer várias passagens com o ROV sob a boia a 5/10 metros de profundidade.

Apêndice III – Teste na piscina da BNL e privada – Sonar sidescan

Objetivo

Esta atividade experimental teve como principal objetivo a verificação dos parâmetros ótimos de utilização do sonar para a detecção de corpos humanos à superfície e recolha de assinaturas sonar para desenvolvimento de uma base de dados.

Procedimento experimental

Duração da experiência (preparação): 17 Horas.

Material

Equipamento: -Computador portátil;
-Fonte de alimentação;
-Crocodilos;
-Ficha Tripla;
-Sonar SideScan;
-Cabo de alimentação/dados do sonar;
-Chapéu de chuva;
-3 Baldes;
-tábua de madeira.

Procedimento

- 1- Ligar o cabo de alimentação/dados do sonar à da fonte de alimentação e ao computador;
- 2- Colocar o sonar no fundo da piscina com o sensor de EB voltado para cima (linha de superfície);
- 3- Iniciar a transmissão do sonar;
- 4- Configurar os parâmetros de tx do sonar: Freq-330 kHz/Gain-20 Db/Range-5 m;

5- Verificar se a profundidade a que se encontra o sonar corresponde à dos dados recolhidos;

6- Passar um corpo a $\pm 0,5$ kts, sobre o sonar (20x);

7- Configurar os parâmetros de tx do sonar: Freq-330 kHz/Gain-30 Db/Range-5 m;

8- Passar um corpo a $\pm 0,5$ kts, sobre o sonar (20x);

9- Configurar os parâmetros de tx do sonar: Freq-800 kHz/Gain-20 Db/Range-5 m;

10- Passar um corpo a $\pm 0,5$ kts, sobre o sonar (20x);

11- Configurar os parâmetros de tx do sonar: Freq-800 kHz/Gain-30 Db/Range-5 m;

12- Passar um corpo a $\pm 0,5$ kts, sobre o sonar (20x);

13- Configurar os parâmetros de tx do sonar: Freq-330 kHz/Gain-20 Db/Range-5 m;

14- Passar o chapéu-de-chuva a $\pm 0,5$ kts, sobre o sonar (5x);

15- Configurar os parâmetros de tx do sonar: Freq-330 kHz/Gain-30 Db/Range-5 m;

16- Passar o chapéu-de-chuva a $\pm 0,5$ kts, sobre o sonar (5x);

17- Configurar os parâmetros de tx do sonar: Freq-800 kHz/Gain-20 Db/Range-5 m;

18- Passar o chapéu-de-chuva a $\pm 0,5$ kts, sobre o sonar (5x);

19- Configurar os parâmetros de tx do sonar: Freq-800 kHz/Gain-30 Db/Range-5 m;

20- Passar o chapéu-de-chuva a $\pm 0,5$ kts, sobre o sonar (5x);

21- Configurar os parâmetros de tx do sonar: Freq-330 kHz/Gain-20 Db/Range-5 m;

22- Passar os 3 baldes de lata a $\pm 0,5$ kts, sobre o sonar (5x);

23- Configurar os parâmetros de tx do sonar: Freq-330 kHz/Gain-30 Db/Range-5 m;

24- Passar os 3 baldes de lata a $\pm 0,5$ kts, sobre o sonar (5x);

25- Configurar os parâmetros de tx do sonar: Freq-800 kHz/Gain-20 Db/Range-5 m;

26- Passar os 3 baldes de lata a $\pm 0,5$ kts, sobre o sonar (5x);

27- Configurar os parâmetros de tx do sonar: Freq-800 kHz/Gain-30 Db/Range-5 m;

28- Passar os 3 baldes de lata a $\pm 0,5$ kts, sobre o sonar (5x);

- 29- Configurar os parâmetros de tx do sonar: Freq-330 kHz/Gain-20 Db/Range-5 m;
- 30- Passar a tábua de madeira a $\pm 0,5$ kts, sobre o sonar (5x);
- 31- Configurar os parâmetros de tx do sonar: Freq-330 kHz/Gain-30 Db/Range-5 m;
- 32- Passar a tábua de madeira a $\pm 0,5$ kts, sobre o sonar (5x);
- 33- Configurar os parâmetros de tx do sonar: Freq-800 kHz/Gain-20 Db/Range-5 m;
- 34- Passar a tábua de madeira a $\pm 0,5$ kts, sobre o sonar (5x);
- 35- Configurar os parâmetros de tx do sonar: Freq-800 kHz/Gain-30 Db/Range-5 m;
- 36- Passar a tábua de madeira a $\pm 0,5$ kts, sobre o sonar (5x).